

**ELABORACIÓN DE MODELO PARA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
DE ESFUERZOS EN LOS TORNILLOS AUTORROSCANTES PARA LÁMINA**

MAURICIO GAMBA CUERVO

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2006**

**ELABORACIÓN DE MODELO PARA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
DE ESFUERZOS EN LOS TORNILLOS AUTORROSCANTES PARA LÁMINA**

MAURICIO GAMBA CUERVO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

ROBERT E. COOPER ORDÓÑEZ
Ingeniero Mecánico
Magíster En Ing. Mecánica
Materiales Y Procesos De Fabricación

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2006

Nota de aceptación:

**Aprobado por el Comité de Grado
en cumplimiento de los requisitos
exigidos por la Universidad
Autónoma de Occidente para
optar al título de Ingeniero
Mecánico.**

Ing. HÉCTOR ENRIQUE JARAMILLO

Jurado

Ing. JULIAN PORTOCARRERO

Jurado

Santiago de Cali, 23 de Junio de 2006

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURAS	9
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2. OBJETIVOS	17
3. MARCO TEÓRICO.	18
3.1. TORNILLOS COMO ELEMENTO DE FIJACIÓN	18
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TORNILLOS	19
3.2.1. Definición	19
3.2.2. Configuración y Formas Estándar de Roscas de los Tornillos de Unión	19
3.2.3. Tipos de Tornillos	23
3.2.3.1. Según su uso	23
3.2.3.2 Según su tipo de rosca	25
3.2.3.3 Según su tipo de cabeza	27
3.3. TORNILLOS DE POTENCIA	28
3.4 ESFUERZOS EN LAS ROSCAS	30
3.4.1 Esfuerzo Cortante	33
3.4.2 Esfuerzo a torsión	34
3.4.3 Esfuerzo axial	34
3.4.4 Esfuerzos según el criterio de Von Mises	35
3.5. FABRICACIÓN DEL TORNILLO	36

3.5.1 Selección del material	37
3.5.2. Procesos de conformación en frío	41
3.5.2.1. Proceso de Remachado (cabeceado)	42
3.5.2.2. Proceso de Rosca	45
3.5.3. Cementación	48
3.5.4. Acabado Superficial	53
4. SEGUIMIENTO DE LOS CAMBIOS ESTRUCTURALES DE LA MATERIA PRIMA EN LA FABRICACIÓN DE TORNILLOS AUTORROSCANTES	58
4.1 MATERIAL DE ACERO 1018 DESPUÉS DE SER TREFILADO	58
4.2 MUESTRA DEL MATERIAL DESPUÉS DEL PROCESO DE REMACHE	62
4.3 MUESTRA DEL MATERIAL DESPUÉS DEL PROCESO DE ROSCADO	66
4.4 MUESTRA DEL TORNILLO DESPUÉS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE CEMENTADO	67
5. ANÁLISIS PARA TORNILLOS AUTORROSCANTES	71
5.1. PRUEBA DE LÁMINA	73
5.2 ESFUERZO DE TORSIÓN Y AXIAL EN LOS TORNILLOS LÁMINA CON UN TORQUE TEÓRICO	80
5.3 ESFUERZO DE TORSIÓN Y AXIAL EN LOS TORNILLOS LÁMINA CON UN TORQUE EXPERIMENTAL	82
5.4 TORQUE MÁXIMO DE AJUSTE PARA LOS TORNILLOS LAMINA	85
6. RESULTADOS OBTENIDOS.	90
7. PROPUESTA DE MODELO PARA ANALIZAR TORNILLOS AUTORROSCANTES	92
8. CONCLUSIONES	96
9. RECOMENDACIONES	97

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de roscas más comunes	26
Tabla 2. Tipos de cabezas de tornillos más comunes	27
Tabla 3. Factores K promedio para tornillos en acero.	32
Tabla 4. Factores de área para el área de cortante de barrido de rosca	33
Tabla 5. Temperaturas recomendadas para el temple de los aceros de bajo carbono	50
Tabla 6. Espesor de capa de cementita	52
Tabla 7. Dureza y resistencia máxima a la tracción para aceros	53
Tabla 8. Requisitos de resistencia a la corrosión	56
Tabla 9. Características del tornillo Autorroscante	71
Tabla 10. Espesor de placa estándar y tamaño de agujero	74
Tabla 11. Torques de aplicación en tornillos lámina calibre No 8	82

Tabla 12. Torque mínimo requerido	85
Tabla 13. Torque de ajuste al cual falla el tornillo	87
Tabla 14. Resumen de valores obtenidos durante el análisis	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Porcentaje total de carga que está siendo soportada por cada hilo.	15
Figura 2: Forma de Rosca Unificada	20
Figura 3. Configuración de una rosca externa e interna	21
Figura 4. Perno con tuerca	24
Figura 5. Tornillo de maquina	24
Figura 6. Espárrago	25
Figura 7. Diagrama de cuerpo libre en las roscas de un tornillo	28
Figura 8. Ejemplo de la curva precarga-torque	32
Figura 9. Diagrama de Flujo Fabricación de Tornillería.	36
Figura 10. Perlita esférica en un acero	40
Figura 11. Perlita laminar en un acero.	41
Figura 12. Proceso de Remachado.	43

Figura 13. Proceso de Remachado.	44
Figura 14. Pasos del proceso de remache de fabricación de tornillos.	45
Figura 15. Proceso de rosca.	47
Figura 16. Resumen de procesos	57
Figura 17. Muestra del núcleo x 200 atacada con nital al 2%	59
Figura 18. Muestra de la superficie x 100 atacada con nital al 2%	59
Figura 19. Núcleo, sección circular x 200 atacado con nital al 2%	60
Figura 20. Superficie, sección circular x 50 atacado con nital al 2%	61
Figura 21. Dirección del grano en un blanco de alambre.	62
Figura 22. Dirección del grano del acero después de ser conformado	63
Figura 23. Superficie de la cabeza x 50 atacado con nital al 2%	64
Figura 24. Parte inferior de ranura del remache x 50 atacado con nital al 2%	64
Figura 25. Dirección del grano en el núcleo del vástago del tornillo atacado con nital al 2%	65

Figura 26. Primer filete de trabajo de un tornillo autorroscante x 50 atacado con nital al 2%	66
Figura 27. Muestra del núcleo del tornillo con rosca x 50 atacado con nital al 2%.	67
Figura 28. Primer filete del tornillo cementado x 50 atacado con nital al 2%	69
Figura 29. Núcleo después de cementado x 50 atacado con nital al 2%	69
Figura 30. Ranura del tornillo después del cementado x 50 atacado.	70
Figura 31. Tornillo Autorroscante 8 x 1/2 CC PH	72
Figura 32. Prueba de lámina para tornillos autorroscantes	75
Figura 33. Diferencia de diámetros	76
Figura 34. Desarrollo de los diámetros	77
Figura 35. Prueba de torque	86
Figura 36. Modelo para el análisis de tornillos Autorroscante	93

RESUMEN

Se pretende dar importancia a los tornillos autorroscantes, como elementos de fijación esenciales en el mundo actual, describiendo sus características más importantes y la forma de analizar este tipo de tornillos en un caso dado, sentando como base las variables mas importantes en el momento en que forma la rosca, para que en estudios posteriores se pueda realizar una simulación tomando dichas variables.

La fabricación de los tornillos autorroscantes, es muy similar a la fabricación de lo tornillos en general, partiendo de un análisis de cual va a ser la finalidad del tornillo o el uso que se le va a dar, para así seleccionar el material adecuado para dicho uso. Ya que el proceso de fabricación no es en torno si no por conformación en frío del material, primero se formara lo que es cabeza y cuerpo del tornillo para luego formar la rosca del mismo, por medio de laminación del material. La característica de tornillo autorroscante se la da el proceso de cementación, el cual le da un aumento de dureza en la superficie del tornillo, y permitiendo que en el momento de la aplicación este pueda formar su propia rosca.

Los fabricantes de tornillería se basan en las normas internacionales, para llegar a la geometría final del tornillo, como también para saber cual debe ser el torque de aplicación, y el agujero previo que debe llevar el material a roscar, para que el desempeño del tornillo sea optimo.

Partiendo de estas normas, se identifican cuales son las variables principales, que hacen parte de la unión o fijación al usar un tornillos autorroscante, dando así comienzo a un análisis, que involucra elementos como cargas de aplicación y esfuerzos entre otros.

INTRODUCCIÓN

Los tornillos autorroscantes para lámina son diseñados para producir su propia rosca y así unir firmemente piezas tales como láminas cold rolled entre otros.

Estos tornillos son fabricados con materias primas principalmente importadas, además son cementados para aumentar su dureza y dependiendo su uso se utilizan acabados que generan una alta resistencia a la corrosión.

La influencia de elementos como la geometría y material del tornillo, entre otros, en el momento en que el tornillo autorrosca la pieza, son objeto de estudio y análisis, para ubicar un modelo de estudio de tornillos autorroscantes; modelo que en los textos no se describe o se nombra.

Las exigencias y controles de calidad deben ser altas, para cumplir con expectativas de funcionamiento dentro de empresas donde el tornillo autorroscante para lámina hace parte fundamental en una línea de ensamble y donde se espera que no halla ningún tipo de fallas que pueda afectar la productividad de esta empresa.

Para el éxito del funcionamiento de estos tornillos es necesario una buena preparación de la materia prima y un control de cada uno de los procesos

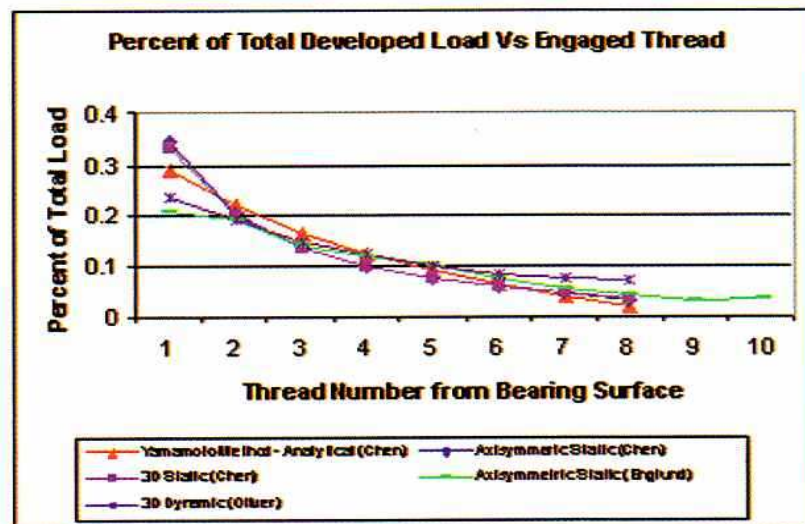
requeridos para llegar al producto terminado: (trefilación, remachado (encabezamiento), laminación (roscado), cementación y galvanoplastia).

En este proyecto por medio de un software, se quiere simular los esfuerzos generados sobre el tornillo al momento de la sujeción que hace un tornillo a una lámina, y analizar el comportamiento de este. La aplicación de este tipo de software, se ha hecho en procesos similares, como bien lo muestra Michael P. Oliver en su artículo “*El paso siguiente al análisis de uniones con pernos*”, en el cual dice:

Los investigadores encontraron que los primeros tres hilos de la rosca de un tornillo, soportan de un 60 a un 70% de la carga desarrollada para ocho y 10 hilos de unión... Los resultados del modelo FEA (análisis de elemento finito) tienen muchas implicaciones a los resultados de una unión real. La diferencia calculada es del 5.5% entre lo real a lo simulado, lo cual da veracidad a esta afirmación¹.

En la parte final del Trabajo de Grado, el método de Elemento Finitos complementara el análisis en una simulación, que bien podría constituirse como herramienta de estudio para una investigación posterior.

Figura 1: Porcentaje total de carga que está siendo soportada por cada hilo.



OLIVER. Michael P. The next step in bolted joint analysis (El paso siguiente al análisis de uniones con pernos). En: Revista "Fastener Technology International N° 28, Junio – Julio 2005. p. 20-21.

¹ OLIVER. Michael P. The next step in bolted joint analysis. En: Revista "Fastener Technology International N° 28, Junio – Julio 2005. P. 20-21. ISSN: 0746-2441.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo y la llegada de nuevas tecnologías de simulación de procesos en los últimos años, ha obligado a su utilización como herramientas de trabajo para condiciones reales, tal es el caso de el programa ALGOR que utilizando el método de elementos finitos simula la ubicación y la concentración de esfuerzos de una pieza.

En los tornillos tipo autorroscantes para lámina (self tapping screws) es fácil predecir dónde ocurrirá la fractura del tornillo cuando se le aplica un sobre-torque, mas lo que no se hace simple es la cuantificación de la concentración de esfuerzos durante el uso de este tornillo.

Usando la herramienta ALGOR es factible conocer qué está ocurriendo en el tornillo en el momento en que se somete a la resistencia del material, el cual está siendo roscado mientras se le aplica un par torsor.

Es necesario aclarar que para poder tener un análisis completo, primero se debe describir cómo ha sido el comportamiento de la materia prima durante cada uno de los procesos de fabricación del tornillo, planteando un modelo donde se involucran dichos procesos, pieza clave para un análisis muy aproximado a la realidad utilizando ALGOR.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo para el análisis de esfuerzos y deformaciones del tornillo autorroscante (self tapping screws) mientras se somete a un par torsor y a la resistencia del material el cual está roscando.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1 Hacer seguimiento de los cambios estructurales de la materia prima del tornillo lámina, cuando pasa por cada uno de los procesos de fabricación de tornillería para identificar, y cualificar las posibles causas por las cuales un tornillo autorroscante en lámina puede ser no funcional.

2.2.2 Identificar las variables críticas presentes durante la unión del tornillo autorroscante y la parte roscada.

2.2.3 Analizar la influencia de dichas variables en la simulación en ALGOR.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1. TORNILLOS COMO ELEMENTO DE FIJACIÓN.

Actualmente en Colombia los tornillos autorroscantes para lámina, son el tipo de tornillos, entre los pequeños, más utilizado en la industria como elemento de fijación de partes y láminas en la construcción de una estructura.

Estos tornillos tienen como particularidad que por llevar un tratamiento térmico (cementado), producen su propia rosca en el momento que se están usando.

Por ser parte de procesos de ensamble, los tornillos lámina ocasionalmente presentan problemas en el funcionamiento del mismo tales como: rompimiento de la cabeza, deformación en la rosca, entre otros.

Para profundizar en este tipo de análisis previo a lo que se pretende en el presente estudio, se considera pertinente profundizar en los elementos esenciales que caracterizan los tornillos en su aplicación tecnológica.

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TORNILLOS.

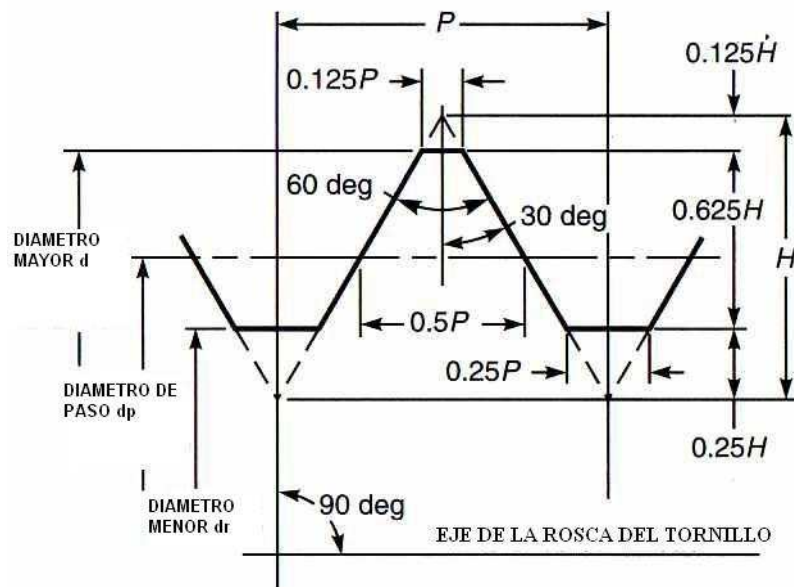
3.2.1. Definición. En general, el tornillo se constituye en elemento mecánico de sujeción, ajuste o transmisión de fuerza, formado esencialmente por un plano inclinado y enroscado alrededor de un cilindro o cono. Las crestas formadas por el plano enroscado se denominan filetes, y según el empleo que se les vaya a dar, pueden tener una sección transversal cuadrada, triangular o redondeada.

3.2.2. Configuración y Formas Estándar de Roscas de los Tornillos de

Unión. La rosca es un filete continuo de sección uniforme y arrollada como una elipse sobre la superficie exterior e interior de un cilindro. Su finalidad es hacer la sujeción de una pieza, garantizando el ajuste o transmisión de fuerza a otra, dentro de un mecanismo o estructura. En otras palabras, sería muy difícil pensar en el diseño de una pieza industrial cualquiera, sin pensar en el uso de los tornillos, y además, de la aplicación de tornillos sin rosca, pues dejaría de ser un tornillo.

La forma de las roscas de los tornillos de unión eran distintas en cada país fabricante de importancia; pero después de la segunda guerra mundial se estandarizaron en Gran Bretaña, Canadá y Estados Unidos, en lo que ahora se conoce como la UNS, tal como se aprecia en la figura 2.

Figura 2: Forma de Rosca Unificada



INDUSTRIAL FASTENER INSTITUTE. Inch Fastener Standards, 7th Edition, February 2003.

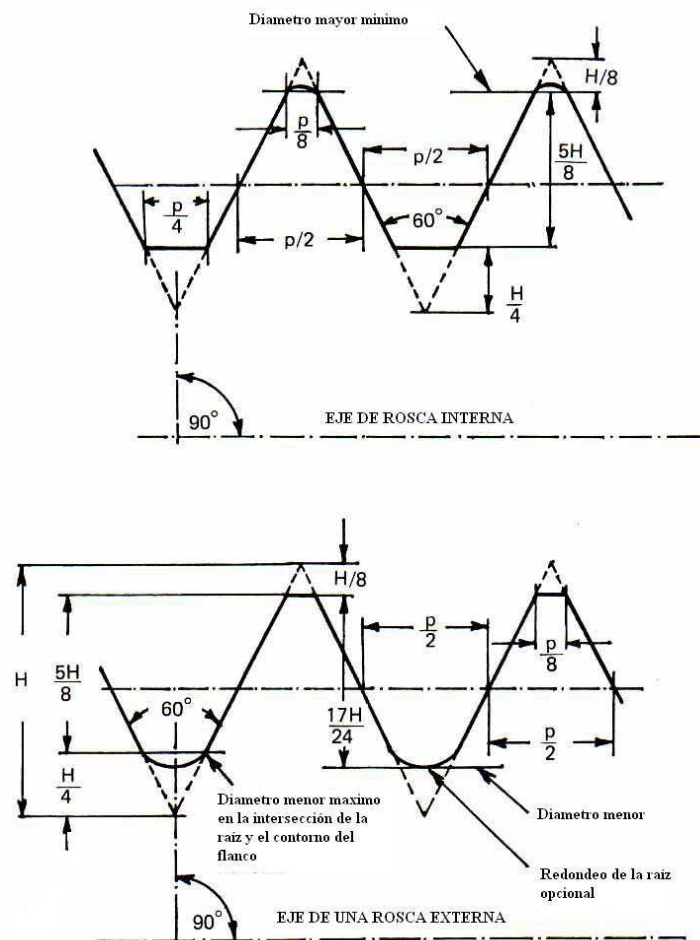
La ISO (International Organization for Standardization) también ha definido un estándar europeo, y en esencia la rosca tiene también la misma forma de sección transversal de la UNS con la diferencia que tiene medidas métricas, por lo que no se pueden intercambiar los dos tipos de roscas. Ambas normas manejan un ángulo de rosca de 60° y definen la rosca las siguientes partes:

- **Rosca externa:**

Es la que se forma en la superficie externa de un cilindro, tal como se muestra en la figura 3.

- **Rosca Interna:** Es una rosca tallada en el interior de una pieza, tal como sucede en una tuerca. En tal situación, la rosca es parcialmente visible al usuario.

Figura 3. Configuración de una rosca externa e interna



INDUSTRIAL FASTENER INSTITUTE. Inch Fastener Standards, 7th Ed, February 2003.

- **Diámetro Mayor:**

Es el mayor diámetro d , en una rosca interna o externa y es la que define su tamaño.

- **Diámetro Menor:**

Es el menor diámetro d_r de una rosca interna o externa.

- **Diámetro de Paso d_p :**

Es el diámetro de un cilindro imaginario que pasa por los filetes en el punto en el cual el ancho de estos es igual al espacio entre los mismos. Este se define en función del paso de la roca.

- **Paso (p):**

Es la distancia entre las crestas de dos filetes sucesivos. También es el espacio que existe desde un punto sobre un filete hasta el punto correspondiente sobre el filete adyacente, cuya medida se efectúa paralelamente al eje.

- **Avance:**

Es la distancia que está en posibilidad de avanzar el tornillo, con relación a la tuerca en una rotación. Para un tornillo de rosca sencilla, el avance sería igual al paso; para uno de rosca doble, el avance es el doble del paso, y así sucesivamente de acuerdo a la magnitud de la rosca.

El sentido de avance de una rosca puede ser derecho o izquierdo. Esto significa que una rosca derecha avanza axialmente (sobre su eje) al girarla de acuerdo a la ley de la mano derecha. En una rosca izquierda esta ley no se cumple. El sentido de avance izquierdo se usa principalmente por seguridad, como sucede en las válvulas de balones de gas.

3.2.3. Tipos de Tornillos. Aunque podrían tomarse como punto de referencia otras fuentes, la más confiable para determinar los tipos de tornillos, la cual es la más comúnmente aceptada por la comunidad científica y la industria en general, es la realizada por la Organización IFI (Industrial Fastener Institute)², quien además trabaja con los estándares ANSI.

Para una mejor comprensión se resaltaré este punto clasificando los tipos de tornillos dependiendo de su uso, tipo de rosca y tipo de cabeza:

3.2.3.1. Según su uso:

Perno:

En la figura 4 se muestra un sujetador con cabeza y vástago recto roscado, el cual se creo pensando para utilizarlo con tuerca con el fin de mantener unido el conjunto.

² Industrial Fastener Institute. Inch Fastener Standards, 7 ed. Cleveland: IFI, 2003. p.5.

Figura 4. Perno con tuerca



NORTON, Robert L. Diseño de Maquinas. México: Prentice Hall, 1999. p 909.

Tornillo de maquina:

Es un sujetador con cabeza y vástago recto roscado al igual que el perno, pero la diferencia esta en que es roscado no empalma con una tuerca sino con un ubicador fabricado en la misma pieza que se desea sujetar, con el mismo tipo de rosca haciendo las veces de tuerca. Además un perno se introduce en un agujero sin rosca y queda estacionario mientras que el tornillo gira sobre su propio eje mientras se introduce en el agujero. En la figura 5 se muestra un ejemplo de un tornillo de maquina.

Figura 5. Tornillo de maquina

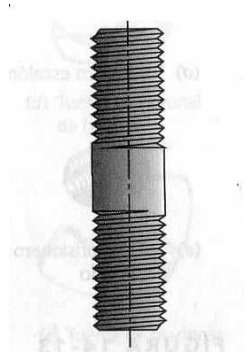


NORTON, Robert L. Diseño de Maquinas. México: Prentice Hall, 1999. p 909

Espárragos.

Es un sujetador sin cabeza roscado en los dos extremos sin variación de diámetro. Su uso es quedar atornillado de manera semipermanente en una de las mitades de un ensamble. En la figura 6 se muestra un ejemplo de un espárrago.

Figura 6. Espárrago



NORTON, Robert L. Diseño de Maquinas. México: Prentice Hall, 1999. p 909

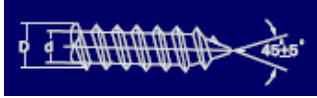
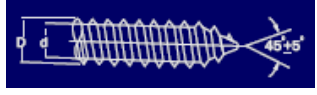
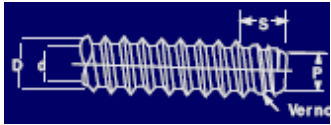
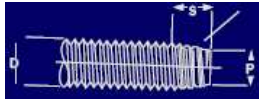
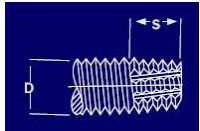
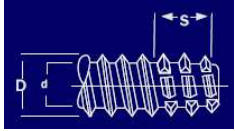
3.2.3.2 Según su tipo de rosca.

Tornillo Autorroscante:

Todos los tornillos diseñados para hacer su propia rosca en el momento de la unión se conocen como tornillos autorroscantes.

Los tipos de rosca más comunes aparecen en la tabla 1:

Tabla 1. Tipos de roscas más comunes

TIPO DE ROSCA	USO	DIBUJO
A	Usado en láminas delgadas, maderas prensadas, o materiales a base de asbesto.	
AB	Tiene el mismo uso de los tornillos tipo A, triples impregnado de resinas, fundiciones no ferrosas. Debe llevar perforación previa al ensamble.	
B	Al tener igual paso que la rosca tipo AB, tiene el mismo uso, pero para materiales mas pesados se recomienda el tipo B, ya que inicia el corte en su diámetro completo lo cual lo hace mas fácil	
C	Se debe roscar antes de usar el tornillo, ya que no resiste grandes torques.	
F	Principalmente se usa para aluminio, fundición de plomo y zinc, fundición gris, láminas y formas de acero, bronce y plásticos.	
BF	Tiene la misma rosca del tipo B, pero con filos en corte en la planta para ser usados principalmente para materiales tales como plásticos, asbestos y similares.	

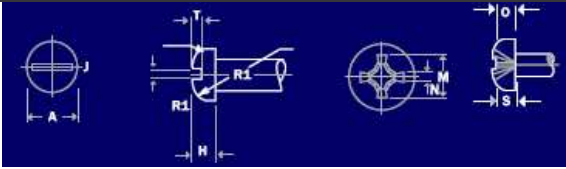

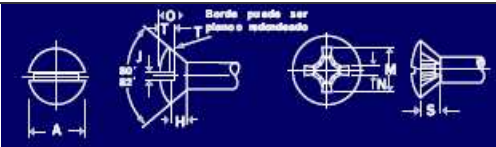
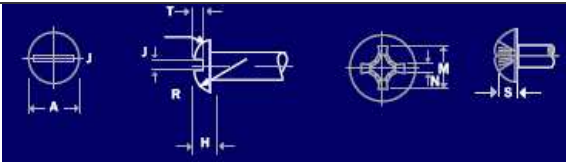
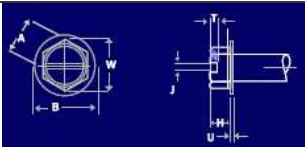
Manual técnico de productos Cato.

Los tornillos presentados en la tabla 1, se usan para uniones que deban soltarse raramente, se recomienda para metales blandos, en carrocerías, en mecánica fina y electrónica.

3.2.3.3 Según su tipo de cabeza. El tipo de cabeza depende básicamente de los requerimientos del usuario y del mercado. En la actualidad los tipos de cabeza mas usados son los cilíndrica (Pan) y plana (Avellán), y estos pueden ser phillips (cruz o estrella), ranurados (pala) e incluso combinados (Combinación de Phillips y Ranura).

Los tipos de cabeza más comunes aparecen en la tabla2:

Tabla 2. Tipos de cabezas de tornillos más comunes

Tipo de cabeza	Dibujo
Pan (Cilíndrica)	
Avellán (Plana)	
Oval	
Lenteja	
Hexagonal con arandela	

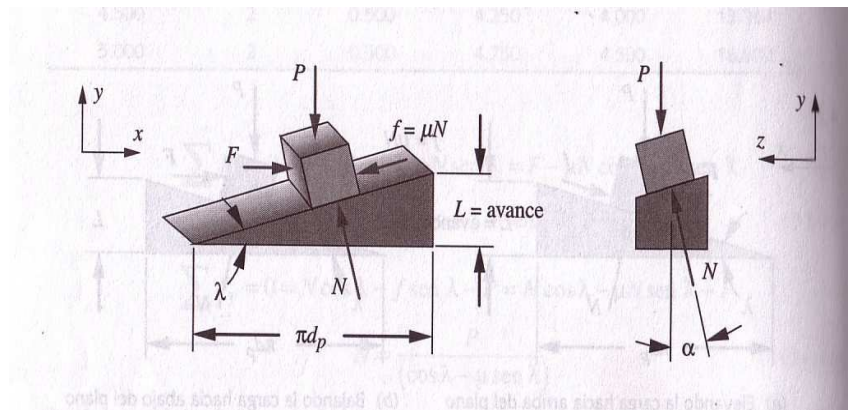
Elementos externos, como las cargas aplicadas a los tornillos y el torque producido por dicha carga, son estudiados en los tornillos de potencia.

3.3. TORNILLOS DE POTENCIA.

Los tornillos de potencia convierten el movimiento rotatorio en movimiento lineal en actuadores, máquinas de producción y gatos elevadores, entre muchas otras aplicaciones.

La figura 7 muestra como actúan las fuerzas en los tornillos de potencia. Para el estudio posterior que tiene que ver básicamente con tornillos lámina o autorroscantes, el estudio básico de los tornillos de potencia es fundamental para la realización de algunos cálculos.

Figura 7. Diagrama de cuerpo libre en las roscas de un tornillo



NORTON, Robert L. Diseño de Maquinas. México: Prentice Hall, 1999. p 899.

En la figura 7, se puede apreciar una revolución de la hélice desenroscada, con una inclinación de la rosca, esta muestra un bloque que representa una tuerca deslizando hacia arriba del plano inclinado. Se aprecia además el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la rosca. En el diagrama de cuerpo libre se puede apreciar la fuerza de fricción f oponiéndose al movimiento. El plano inclinado tiene un ángulo λ o ángulo de avance. La carga P y F es la fuerza producto del torque aplicado también se pueden apreciar en la figura 7.

$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi d_p} \quad (1)$$

Con base en el diagrama de cuerpo libre, se hace sumatoria de fuerzas en x y en y , obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$\text{Para } x: \quad F = N \cos \alpha (\mu \cos \lambda + \text{sen} \lambda) \quad (2)$$

$$\text{Para } y: \quad N \cos \alpha = \frac{P}{(\cos \lambda - \mu \text{sen} \lambda)} \quad (3)$$

Combinando estas dos ecuaciones obtenemos una expresión para fuerza F :

$$F = P \frac{(\mu \cos \lambda + \text{sen} \lambda)}{(\cos \lambda - \mu \text{sen} \lambda)} \quad (4)$$

Donde L es igual a $\text{Sen } \lambda$ y πd_p es igual a $\text{Cos } \lambda$

$$T_{su} = F \frac{d_p}{2} = \frac{P d_p}{2} * \frac{(\mu \pi d_p + L)}{(\pi d_p - \mu L)} \quad (5)$$

Si se tiene en cuenta que los tornillos autorroscantes forman su propia rosca cuando están siendo usados, se puede considerar que el diámetro donde ocurre el trabajo es el diámetro mayor d , dado que será el de mayor torque. Además como se aprecia en la figura 7, el plano Y – Z muestra la inclinación de la rosca, que para los tornillos autorroscantes tiene un ángulo α de 30° , por lo tanto la componente de la normal aplicada sobre el plano inclinado en el X – Y, es $N \cos 30^\circ$.

Por lo tanto la fórmula para los tornillos autorroscantes quedaría así:

$$T_{su} = F \frac{d_p}{2} = \frac{Pd_p}{2} * \frac{(\mu\pi d_p + L \cos \alpha)}{(\pi d_p \cos \alpha - \mu L)} \quad (6)$$

Debido a que la rosca de los tornillos es simple, el avance L es igual al paso de la rosca, P es la carga axial producida por el torque, d el diámetro nominal del tornillo, y F es la carga aplicada para realizar el torque.

3.4 ESFUERZOS EN LAS ROSCAS.

La consideración de esfuerzos en las roscas nos lleva directamente a la práctica de control de precarga y torque.

Si no se estima una falla y si no se aplica la carga adecuada, pueden ocurrir un gran número de problemas y en algunos casos, incidentes muy serios.

Ejemplos de estos tipos de problemas pueden ser los siguientes:

- Se deforman los hilos de las roscas.

- Separación de la junta o unión debido a tornillos con una precarga inadecuada.
- Se rompan los tornillos.

Las siguientes formulas muestran que hay una relación lineal entre el torque aplicado y la precarga desarrollada³.

El área de esfuerzos relevante en tornillos se puede dar por el área transversal de un cilindro la cual se describe en la siguiente ecuación:

$$A_r = 0.7854d_r^2 \quad (7).$$

Donde d_r es definida por el diámetro de raíz del tornillo.

Para esta relación lineal también aplica la formula 6, la cual indica la cantidad de torque requerido para superar cualquier resistencia por fricción al aplicar una precarga F .

Por ultimo esta una forma más usual en diseño para definir el torque:

$$T = KDF \quad (8).$$

Donde D es el diámetro del tornillo expresado en pulgadas y F es la fuerza de apriete dada en libras, para asegurar que el torque se exprese en libras por pulgada. K es el coeficiente de unión, algunos de sus valores están dados por la siguiente tabla:

³ BLAKE Alexander. Design of Mechanical Joints. New York: Dekker, 1985. p.155. ISBN: 0-8247-7351-9.

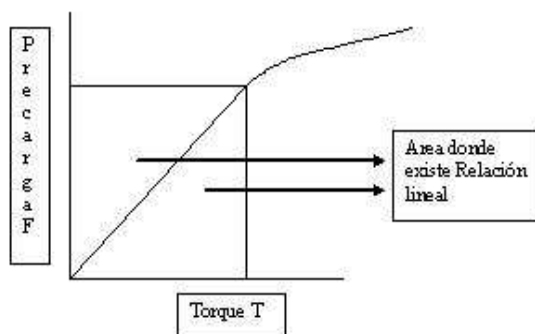
Tabla 3. Factores K promedio para tornillos en acero.

LUBRICANTE INDUSTRIAL	K
Acero con acero	0.2
Fel –Pro 65 ^a	0.13
Grasa	0.14
Aceite	0.18
Petróleo, y aceites suaves	0.12
Fosfato y aceite	0.19

BLAKE, Alexander. Design of Mechanical Joints. New York: Dekker, 1985. p155.

De acuerdo a la relación expuesta en la formula 8, la teoría aparece como elemental aun cuando en la realidad esta relación lineal ocurre, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 8. Ejemplo de la curva precarga-torque



BLAKE, Alexander. Design of Mechanical Joints. New York: Dekker, 1985. p155.

Para el calculo de los esfuerzos en las roscas se consideran dos casos que son extremos entre si. Uno de los casos es suponer que un par de hilos toman la totalidad de la carga y el otro es que todos los hilos acoplados comparten la carga por igual. El esfuerzo real se presenta normalmente entre estos dos extremos o consideraciones.

3.4.1 Esfuerzo Cortante. Si se expresamos el área del cortante A_s para una rosca de tornillo es el área de diámetro menor d_r .

$$A_s = \pi d_r w_i p \quad (9)$$

Donde p es el paso de la rosca y w_i es un factor que define el porcentaje del paso ocupado por metal en el diámetro menor.

El esfuerzo cortante para el barrido de roscas τ_s se determina entonces a partir de:

$$\tau_s = \frac{F}{A_s} \quad (10)$$

Tabla 4. Factores de área para el área de cortante de barrido de rosca

Tipo de rosca	W_i (menor)	W_o (mayor)
UNS/ ISO	0.8	0.88
Square	0.5	0.5
Acme	0.77	0.63
Buttress	0.9	0.83

NORTON, Robert L. Diseño de Maquinas. México: Prentice Hall, 1999. p 907.

3.4.2 Esfuerzo a torsión. Cuando se aprieta una tuerca en un tornillo, o cuando se le transmite un par de torsión a un tornillo, en el tornillo se desarrolla un esfuerzo de torsión.

Para calcular el esfuerzo cortante generado sobre el tornillo se debe usar la siguiente formula:

$$\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d_r^3} \quad (11).$$

En la ecuación anterior se tomo el área de raíz que esta sometida a esfuerzo cortante por torsión, porque este tipo de tornillo presenta un gran porcentaje de separación y además esto ofrece un pequeño porcentaje de seguridad adicional en el calculo.

3.4.3 Esfuerzo axial. Pruebas con varillas roscadas⁴, sujetas a cargas puras a tensión, se presenta en el área que se define en la formula 7.

Por lo tanto el esfuerzo axial en un tornillo será:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_r} \quad (12).$$

⁴ NORTON, Robert L. Diseño de Maquinas. México: Prentice Hall, 1999. p 894.

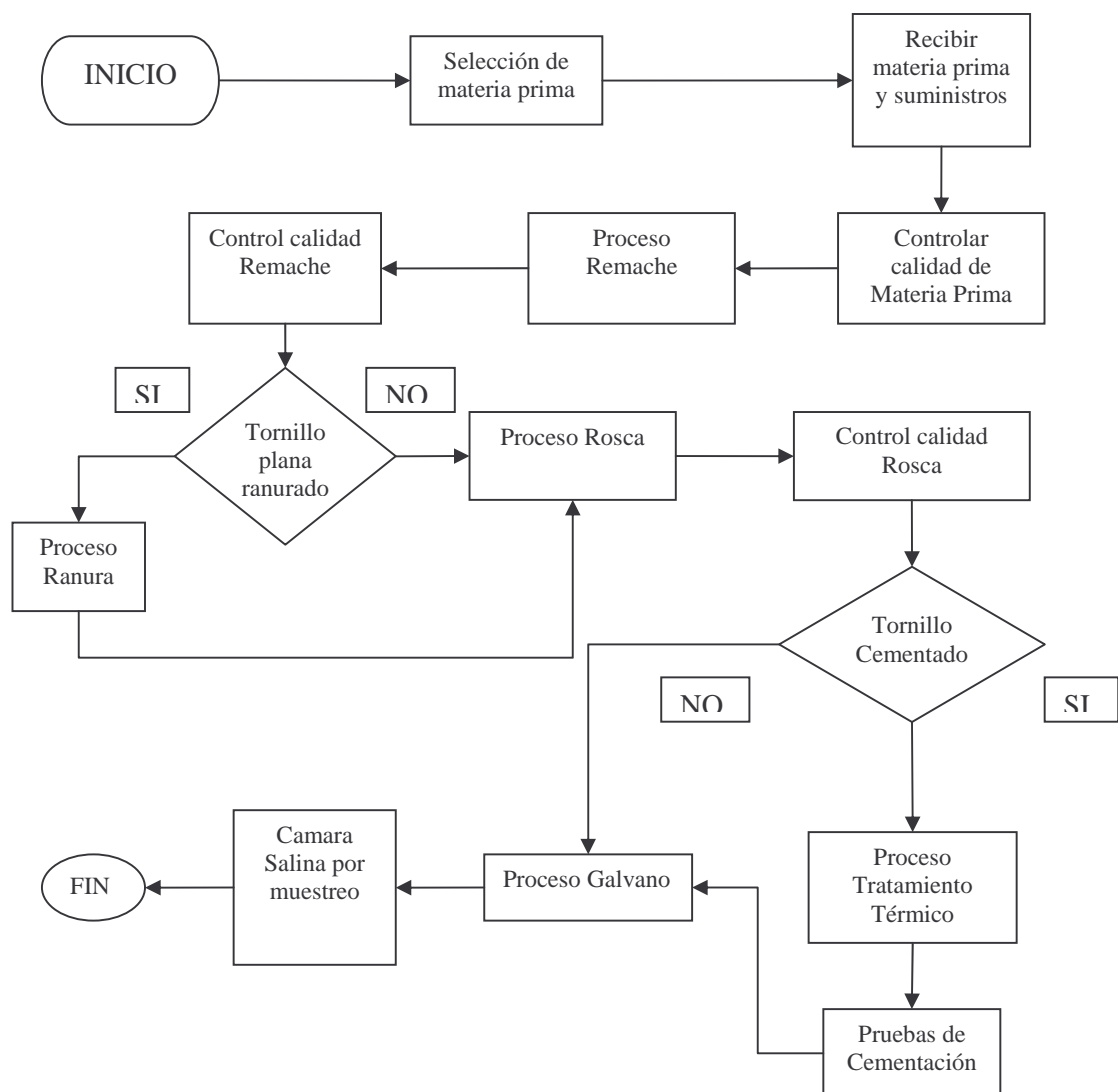
3.4.4 Esfuerzos según el criterio de Von Mises. Para este desarrollo se considero como apropiado el criterio de von mises, dado su gran aproximación a la realidad y por recomendación de profesores de diseño mecánico de la Universidad Autónoma de Occidente.

$$\sigma_1 \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y \pm \sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2} \quad (13).$$

$$\sigma_e = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2)^{1/2} \quad (14).$$

3.5. FABRICACIÓN DEL TORNILLO. Para representar mejor el proceso de fabricación de los tornillos, se toma como ejemplo el proceso seguido en Industrias cato, el cual se muestra en el diagrama de flujo de la figura 9.

Figura 9. Diagrama de Flujo Fabricación de Tornillería.



3.5.1 Selección del material. El proceso de selección del material de fabricación de un tornillo, está sujeto a los siguientes pasos:

Requerimientos básicos de fabricación.

Como primera medida, la selección del material en la fabricación de un tornillo es un proceso de planeación y desarrollo previo del producto, de acuerdo a unos requerimientos técnicos y de uso práctico, determinados por la práctica industrial y especificados técnicas o por las exigencias del usuario final.

Aplicando estos principios prácticos, se dan situaciones muy concretas en la fabricación de un tipo de tornillo. Por ejemplo, un usuario dice, al solicitar el producto: *“Necesito tornillos en varias dimensiones y con varias aplicaciones, que van a ser destinados en la fabricación y montaje de ventanas en la industria de la construcción, específicamente en los Departamentos de la Costa Atlántica Colombiana”*.

De acuerdo con estos requerimientos y exigencias, corresponde al fabricante interpretar técnicamente los deseos del usuario, especificando en la planeación y desarrollo del producto los siguientes elementos: material de dos opciones; como primera opción, acero al carbono C-1018, calidad *Cold Heading*. Luego de hacer el proceso de fabricación con esta materia prima, en el acabado superficial, se le agregará a dicho acabado un recubrimiento electrolítico (aplicación de zinc) que genere resistencia a la corrosión. La segunda opción, sería escoger un acero inoxidable de calidad *Cold Heading* del orden de la serie SAE 300, el cual tiene propiedades mecánicas similares al tornillo cementado, y una alta resistencia a la corrosión.

En general, la selección del material para la fabricación de tornillos, se determina en primer lugar por el propósito de la pieza. En virtud de esto, el material del tornillo debe ofrecer las características de uso necesarias, o deben proveerse mediante tratamientos térmicos y superficiales.

Una vez se ha determinado, si la conformación del material ha de realizarse a temperatura ambiente (en frío) o a temperatura elevada (en caliente), se puede especificar mejor el tipo de material. Así mismo, se determina el estado del material de partida.

A continuación se analizan los aceros para la conformación solamente en frío debido a que el proceso de fabricación de tornillos autorroscantes, asunto de este estudio no se hace por conformación en caliente.

- **Aceros para conformación en frío.**

Las exigencias para la conformación en frío excluyen a muchos aceros. Esto quiere decir que no toda clase de aceros está capacitada para realizar procesos de conformación en frío.

En tales casos, hay que tener en cuenta los procesos de fundición del acero en la fabricación de tornillos, ya que en la conformación en frío, han de excluirse los aceros que contienen gases, como es el caso del nitrógeno. Estas afirmaciones se corroboran con las investigaciones de Billigman/Feldmann⁵, donde explican que en general, cuando los aceros tienen un contenido de nitrógeno entre 0.01% y 0.03% como los aceros del tipo Thomas, dicho acero sufre un aumento considerable de la dureza, ya en pequeñas conformaciones en frío y, además su

tenacidad disminuye de manera intolerable. El resultado son rupturas debido a la fragilidad en las zonas conformadas.

En la microestructura de los acero al carbono en estado recocido, se hallan dos diferentes elementos: la ferrita y la perlita⁵. La estructura ferrítica es de fácil conformación en frío dado que contiene muy bajo porcentaje de carbono. En cambio la perlita contiene la mayoría del carbono que existe en el acero y es difícilmente conformable en frío. Todo acero es más conformable cuanto menor es la proporción de perlita, es decir, cuanto menor es el contenido de carbono. Por lo tanto, la influencia del contenido de carbono sobre la conformabilidad en frío del acero es predominante y más grande que cualquier otro elemento de aleación. Por lo tanto para el recalcado es preferible un acero con contenidos de carbono que no pasen de 0.50%. Solamente en casos especiales se trabaja en frío aceros hasta el 1.1%, por ejemplo, en la fabricación de rodamiento de bolas.

Aparte del carbono, el silicio y el níquel también tienen influencia sobre la conformabilidad en frío del acero. Dicho de otra forma, con la estructura del acero, se puede asegurar si la conformabilidad en frío es posible. Ésta tiene que ser uniforme, y, en caso de aceros con bajo contenido de carbono, tendría que estar equilibrada la estructura del acero.

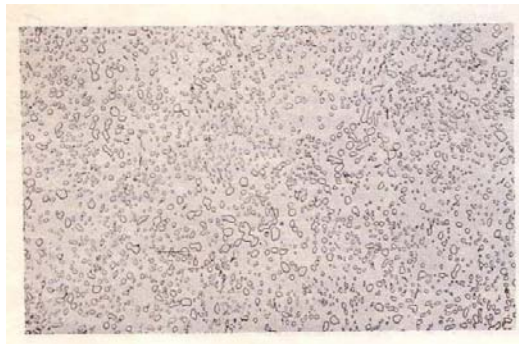
En aceros con un mayor contenido de carbono ($\leq 0.2\%$), la componente perlítica del carbono deberá que tener una estructura esférica. Esta formación perlítica se produce en el recocido de ablandamiento. En cambio, si no se le hace al material un recocido blando suficiente, la perlita se presenta en tiras o láminas. Cuando la perlita se encuentra en este estado, la conformación en frío de este acero podrá

⁵ BILLIGMAN/FELDMAN. Estampado y prensado a maquina. Barcelona: Reverté, 1979. p. 7. ISBN: 84-291-6034-5.

⁶ BILLIGMAN/FELDMAN. Estampado y prensado a maquina. Op cit, p 40.

tener grietas por cizallamiento. Esto quiere decir que al hacer la forma del tornillo, en la cabeza se podrían presentar rupturas indeseables debido a que el material estaba muy frágil en su configuración. A continuación, en la micrografía mostrada en la figura 10 se muestra la perlita en acero bien recocido.

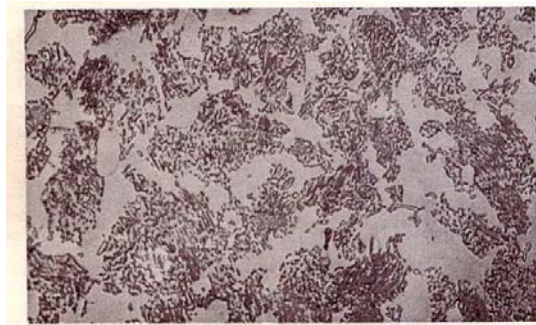
Figura 10. Perlita esférica en un acero



Billigmann / Feldmann. Estampado y prensado a máquina.

En aras de establecer elementos comparativos visuales, a continuación se aprecia en la micrografía mostrada en la figura 11, la textura de la perlita en un acero mal recocido.

Figura 11. Perlita laminar en un acero.



Billigmann / Feldmann. Estampado y prensado a máquina.

Se recomienda en la fabricación de tornillos, realizar un ligero estirado después del recocido, ya que éste obtiene mayor resistencia a la tracción y la estricción es menor.

3.5.2. Procesos de conformación en frío. Los procesos de fabricación se consideran trabajo en frío, si los granos del material están de forma alargada, después de finalizada la deformación plástica.

Todas las propiedades del material que dependen de su estructura reticular, se ven afectadas por la deformación plástica o por el trabajo en frío.

La resistencia a la tensión, la resistencia a la cedencia o fluencia y la dureza aumentan, mientras que la ductilidad, representada por el porcentaje de alargamiento, disminuye.

El incremento en energía interna, sobre todo en las fronteras de grano, hace el material más susceptible a la corrosión ínter granular⁷.

Entre los procesos de conformación en frío para la fabricación de tornillos, se tienen en cuenta el llamado proceso de remache y de rosca o roscado.

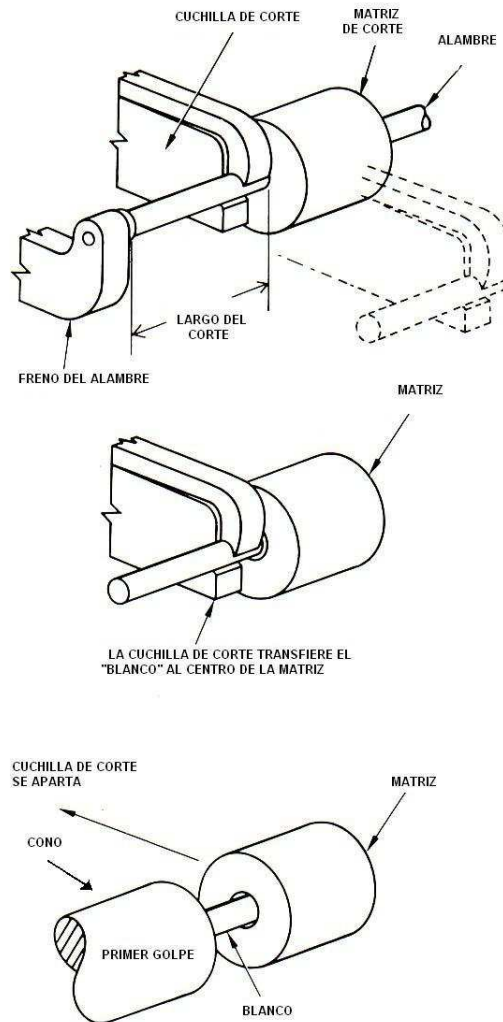
3.5.2.1. Proceso de Remachado (cabeceado). El proceso de remachado consiste en tomar un alambre de acero, que usualmente viene en rollos, y formar con el mismo una parte deseada (o cabeza) a una alta velocidad de fabricación. En este proceso no se remueve material, por lo que no va a haber desecho de éste.

La máquina donde se fabrica la cabeza, en la mayoría de los casos, utiliza dos golpes y una matriz para obtener el remachado. Para el caso de geometrías de cabezas más complicadas o materiales con durezas de grandes magnitudes, se utilizan máquinas de múltiples matrices y múltiples golpes.

La herramienta o matriz cono y remachador, son piezas fundamentales para el control del proceso de conformación en frío, pues tiene la finalidad de dar forma al material. La figura 12 muestra los detalles del proceso de remachado en la fabricación de tornillos. Nótese el papel y orden en el proceso del uso de la matriz, el cono y el remachador.

⁷ BILLIGMAN/FELDMANN. Estampado y prensado a máquina, Op. Cit, p 147.

Figura 12. Proceso de Remachado.

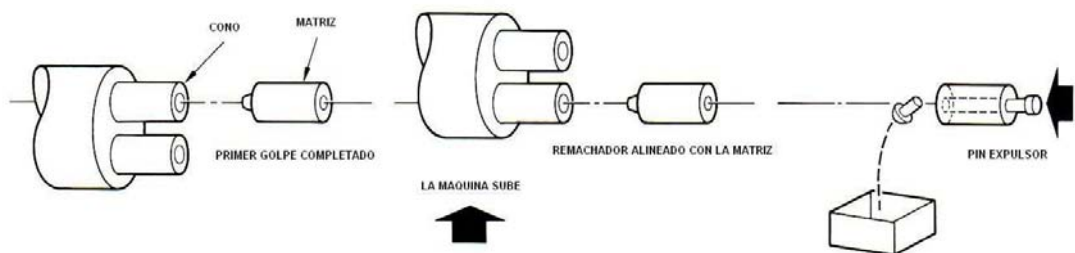


WATERBURY FARREL. The heading store, p 1-37

Los pasos básicos en el proceso de remachado son los siguientes:

- Entrada del alambre a la máquina, en la que simultáneamente se corta una longitud específica del alambre para forma de cabeza. Este alambre ya cortado, adquiere el nombre de “blanco”. Esto se puede ver en la figura 13.
- Este “blanco” entra a una matriz. Ver figura 13.
- El “blanco” recibe el primer golpe. Aquí la herramienta que da el primer golpe es llamada cono. El cono forma lo que se llama “previo”. Cabe anotar que el paso del “blanco” y el “previo” al remache. Ver figura 13.
- La herramienta que tiene la función de dar el segundo golpe en el proceso de remachado en la fabricación del tornillo, se llama remachador. En el segundo golpe en la matriz, se forma la cabeza, la ranura y el cuerpo del tornillo. Ver figura 14.
- Un pin impulsor retira el remache de la matriz justo después de que éste recibe el segundo golpe. Ver figura 14.

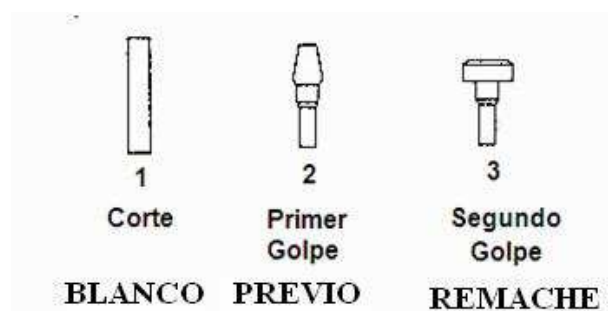
Figura 13. Proceso de Remachado.



WATERBURY FARREL. The heading store, p 1-37

A continuación se aprecian en detalle los pasos de blanco, previo y cabeza (remache), según las técnicas y experiencias de fabricación de tornillos en la industria metalmecánica.

Figura 14. Pasos del proceso de remache de fabricación de tornillos.



Terminado el proceso de remache, continua el segundo proceso de conformación en frío o laminación (rosca) en la fabricación de tornillería.

3.5.2.2. Proceso de Rosca. Las primeras roscas se hicieron por corte o desprendimiento de material. Actualmente la rosca de la mayoría de los tornillos es fabricada por laminación mientras que el corte se usa para lotes de fabricación pequeños.

El método más antiguo de cortar o desprender material para fabricar roscas mecánicamente fue el torno, y este todavía sigue siendo el método más versátil.

El proceso de laminado de roscas ha llegado a ser el método más importante para la producción en grandes series de piezas roscadas. Es una operación de deformación en frío en la cual la rosca se forma haciendo rodar la pieza entre matrices endurecidas, las cuales deforman el material de la pieza dándole la forma

de la rosca deseada. Dado que no hay arranque de viruta ni remoción de metal se requiere menos material, con el consiguiente ahorro; la deformación en frío da un aumento de resistencia y puede producir una superficie de muy buena terminación y gran resistencia al desgaste. Las roscas de la mayoría de los bulones y tornillo comerciales se hacen por laminación. En algunos casos, para roscados grandes se usa el laminado en caliente.

El laminado de roscas es un proceso esencialmente sencillo que utiliza cuatro métodos básicos. El más simple de estos emplea dos peines planos, uno fijo y otro móvil⁸.

- Peine Plano Recíproco: Consiste en un peine fijo y un peine móvil, el remache pasará entre estos dos peines que tienen la forma de la rosca.
- Peine Planetario: Consiste en un peine de grandes dimensiones, de forma circular el cual es rodeado por otro peine en forma de arco los cuales tienen la impresión de la rosca y entre éstos pasan los remaches para que se les sea impregnada la forma de la rosca.
- Triple Peine Cilíndrico: Consiste en tres cilindros que giran en su propio eje, que tienen la impresión de la rosca en la superficie del cilindro, y entre éstos se encuentra el remache para que les sea impregnada la forma de la rosca.
- Doble Peine Cilíndrico: Consiste en dos cilindros girando en su propio eje con la impresión de la rosca en la superficie del cilindro, y entre estos dos cilindros pasa el remache para que se les sea impregnada la rosca.

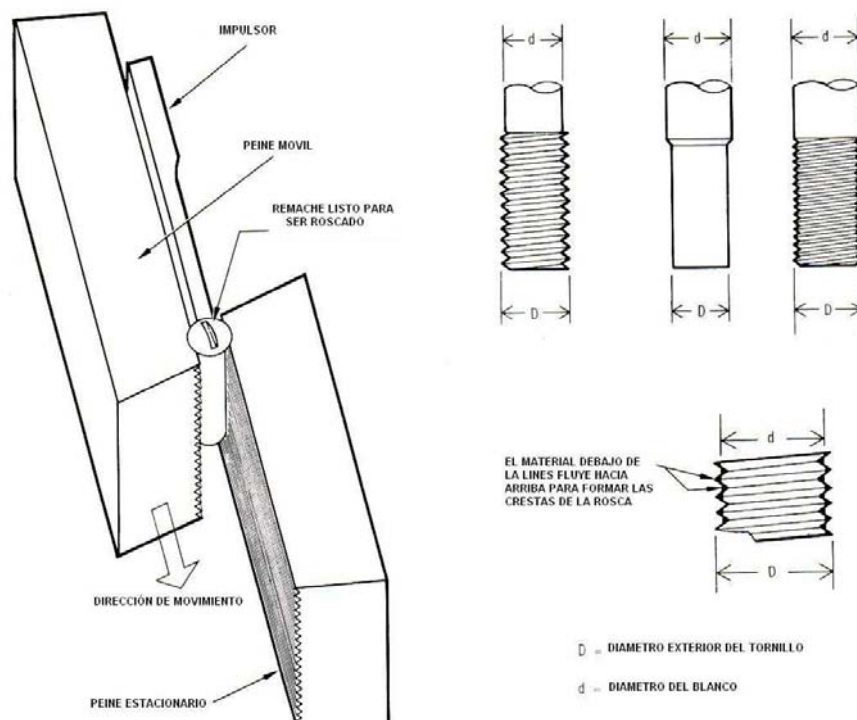
De los procesos de rosca, se hará énfasis en el método del Peine Plano Cilíndrico, ya que es el más usado para la formación de roscas. La combinación de bajos

⁸ ORLOMOSKI, Roger W, Manual de proceso de rosca. Fastener tooling, Inc. S.I: 1975. p11 .

costos, versatilidad y la velocidad en la producción, hacen de este método el más atractivo.

El trabajo en la máquina roscadora, lo realizan básicamente dos peines, uno fijo y otro móvil. Estos peines son las herramientas encargadas de darle la forma roscada al tornillo. Entre estos dos peines estará el vástago y por presión ejercida por los dos peines, el vástago del tornillo tomará la forma de un cuerpo con rosca tal como se puede apreciar en la figura 15.

Figura 15. Proceso de rosca.



WATERBURY FARREL. The heading store, p 1-50.

El proceso de rosca se realiza en los siguientes pasos:

- La maquina roscadora es alimentada con tornillos sin roscar.
- El sistema de alimentación transporta el remache hasta un punto donde un dedo impulsor empuja el remache entre un peine fijo y uno móvil.
- El peine móvil se mueve en forma paralela a como esta ubicado el peine fijo, haciendo que el remache rote sobre su propio eje y a la vez se traslade a lo largo de ambos peines.
- Durante esta rotación y traslación las caras de los peines que tiene la impresión de la rosca, producen en el vástago un movimiento de material que hacen que éste se alargue para poder que se impregne la forma de la rosca.
- El tornillo es expulsado por el mismo movimiento del peine móvil.

Debido a que el tornillo autorroscante es la base de este estudio se procede a estudiar el proceso de cementado.

3.5.3. Cementación. En los tornillos autorroscantes ocurre algo similar a lo que sucede con las piezas de algunos mecanismos de maquinaria, necesitan una superficie con condiciones de dureza y resistencia al desgaste mayores a las condiciones naturales del material en su núcleo, el cual es tenaz para poder soportar las cargas a las cuales van a estar sometidas.

La cementación, uno de los procesos más antiguos de los procedimientos de endurecimiento superficial, consiste en aumentar el contenido de carbono en la superficie de la pieza de acero, rodeándola con una atmósfera carburante, y manteniéndola, durante un cierto tiempo a elevada temperatura. Luego se temple la pieza y queda con una gran dureza superficial.

En este proceso básicamente se pueden apreciar dos etapas: la primera es la absorción de carbono por el acero, y la segunda mejoramiento de características por medio de tratamientos térmicos adecuados.

La cantidad y la distribución del carbono absorbido por las piezas en general, y en el caso específico los tornillos tienen las siguientes consideraciones:

- El porcentaje de carbono debe estar entre 0.08% y un 0.25%⁹, para los tornillos autorroscantes con un espesor de capa de cementación de 0.2 mm.
- La naturaleza de la sustancia cementante dentro del horno donde se realizara este proceso. En el caso de la fabricación de tornillería puede ser Alcohol y Nitrógeno.
- La temperatura de sostenimiento dentro del horno, la cual debe de estar por encima en promedio unos 50° C de la temperatura de austenización para los aceros bajos en carbono (ver figura), ya que a esta temperatura ocurre la absorción de carbono.

F.E Harris (Metal Progress, Agosto 1943) desarrollo una formula para el efecto del tiempo y la temperatura en función del espesor de cementita, la cual esta dada por la siguiente expresión¹⁰:

$$Espesor = 660 \bullet e^{-8287/T} \bullet \sqrt{t} \quad (15).$$

⁹ BARREIRO Apreiz Jose, Tratamiento térmico de los aceros. Madrid: Dossat, 2000. p321. ISBN: 84-95312-56-5.

Donde el espesor esta en mm, t es tiempo en horas y T es la temperatura en grados Kelvin (Celsius + 273).

Para el mejoramiento de las características se realiza un temple. Dado que el enfriamiento se hace desde la fase austenítica a una alta velocidad, en el núcleo del tornillo solo va a quedar martencita. De acuerdo a la tabla 5 y como se ve en la figura 16, la temperatura para realizar el temple, cuando la autenización ya esta completada debe ser entre los 900° C y los 925° C, para aceros con un contenido en carbono entre 0.1 y 0.2%.

Tabla 5. Temperaturas recomendadas para el temple de los aceros de bajo carbono

Composición % de C	Temperatura °C	
0.1	925°	AUSTENIZACIÓN COMPLETA
0.2	900°	
0.3	870°	
0.4	840°	
0.5	830°	
0.6	810°	
0.7	780°	
0.8	770°	
0.9	770°	
1.0	760°	AUTENIZACIÓN INCOMPLETA
1.2	760°	
1.4	760°	

BARREIRO APREIZ JOSE, Tratamiento térmico de los aceros, Madrid: Dossat, 2000. p. 94.

¹⁰ METALS HANDBOOK, Heat treating. Ohio: American Society for Metals, 1981. p142. ISBN: 0-87170-010-7.

En el metal hand book, se menciona que la mejor temperatura para la absorción de carbono esta a los 925° C, un 40% mejor que a los 870° C¹¹, y esta temperatura se realiza la cementación en el horno.

Para este tipo de cementación gaseosa, se utilizan hornos continuos, que pueden ser fijos o móviles, calentados con carbón, gas, electricidad y fuel-oil. En estos hornos, la manipulación y el temple son automáticos, tal como es el caso de Industrias Cato, empresa dedicada a la fabricación de tornillos autorroscantes entre otros.

Como se menciono anteriormente, este proceso de aumento de dureza superficial (cementación) es indispensable para los tornillos autorroscantes, debido a que las condiciones iniciales del material, no son suficientes para que cumplir las características de los tornillos autorroscantes.

De acuerdo a las normas internacionales que hablan de los requerimientos mecánicos y de calidad para los tornillos autorroscantes, estos dan parámetros tales como el espesor de la capa de cementación que deben tener los tornillos autorroscantes¹²: A continuación se puede apreciar la tabla 6, la cual muestra las dimensiones del espesor de la capa de cementación que se obtiene midiéndolo microscópicamente:

¹¹ METALS HANDBOOK, Heat treating, Ohio: American Society for Metals. op cit. p 143.

¹² Industrial Fastener Institute. Inch Fastener Standards, 7 ed. Cleveland: IFI, 2003. p.H-69.

Tabla 6. Espesor de capa de cementita

Calibre del tornillo	Espesor total (Pulgadas)	
	Max	Min
4 a 6	0.007	0.002
8 a 12	0.009	0.004
1/4 en adelante	0.11	0.005

INDUSTRIAL FASTENER INSTITUTE. Inch Fastener Standards, 7th Edition, February 2003

Después del proceso de cementación los tornillos autorroscantes deben tener, una dureza superficial de 45 HRC como mínimo y la dureza del núcleo debe ser de 28 a 38 HRC. La dureza del núcleo no debe exceder el máximo y preferiblemente no debe ser mayor a 36 HRC para asegurar que no hallan fallas en el ensamble o en el servicio¹³.

A continuación se puede apreciar las propiedades mecánicas de acuerdo a la dureza del material:

¹³ Industrial Fastener Institute. Inch Fastener Standards, 7 ed. Cleveland: IFI, 2003. p.5.

Tabla 7. Dureza y resistencia máxima a la tracción para aceros

Brinell <i>HB</i>	Vickers <i>HV</i>	Rockwell		Última, σ_u	
		<i>HRB</i>	<i>HRC</i>	MPa	ksi
627	667	—	58.7	2393	347
578	615	—	56.0	2158	313
534	569	—	53.5	1986	288
495	528	—	51.0	1813	263
461	491	—	48.5	1669	242
429	455	—	45.7	1517	220
401	425	—	43.1	1393	202
375	396	—	40.4	1267	184
341	360	—	36.6	1131	164
311	328	—	33.1	1027	149
277	292	—	28.8	924	134
241	253	100	22.8	800	116
217	228	96.4	—	724	105
197	207	92.8	—	655	95
179	188	89.0	—	600	87
159	167	83.9	—	538	78
143	150	78.6	—	490	71
131	137	74.2	—	448	65
116	122	67.6	—	400	58

Nota: Carga de 3 000 kg para HB.

NORTON, Robert L. Diseño de Maquinas. México, Prentice Hall, 1999, p 73.

Las características de los tornillos no se limitan a tener solamente una serie de propiedades mecánicas. Para los efectos de corrosión en los metales existen unos procesos para aumentar su resistencia a la oxidación, la cual implica agregar una capa superficial.

3.5.4. Acabado Superficial. En este proceso de agregar un acabado superficial o recubrimiento, se tiene como finalidad, dar una última propiedad a los tornillos, la cual es una resistencia a la corrosión acorde a las condiciones de servicio.

Entre los diferentes recubrimientos para mejorar la resistencia a la corrosión en superficies metálicas podemos encontrar los siguientes:

- Recubrimiento metálico por electrólisis.
- Recubrimiento metálico por proceso químico.
- recubrimiento metálico por adición directa del metal o proceso térmico.
- Recubrimiento por conversión por vía electrolítica dando protección al metal base en tratamiento superficial que consiste en la formación artificial de una película de óxido.
- Recubrimiento de conversión libre de paso de corriente también llamado fosfatado. En este caso se aplica sustrato de un compuesto de metal base resistente a la corrosión.
- Recubrimiento químico por inmersión, mejor conocido como pavonado. La finalidad del material base es aparecer recubierto de una capa de óxido negro.
- Recubrimiento químico de conversión de superficie.
- Recubrimiento orgánico de protección. Entre estos están el uso de lacas y resinas sintéticas.

Para el caso de los tornillos autorroscantes se tomará como base de análisis únicamente el recubrimiento metálico por electrolisis y el pasivado del tornillo el cual le dará el color y la respectiva resistencia a la corrosión. Para que ocurra un buen recubrimiento por electrodeposición, hay que tener en cuenta el espesor, el brillo, la adherencia y la protección a la corrosión.

Estas propiedades dependen de:

- La densidad de la corriente, la cual para procesos estáticos es de 1 amperio, mientras para procesos de tambor es de 2 amperios.

- La concentración del electrolito. Los constituyentes para la preparación del electrolito libre de cianuro son: Hidróxido de sodio – Óxido de Zinc.

NaOH	HIDROXIDO DE CARBONO	10
----- = ----- = -----		
Zinc	Contenido de Zinc	1

Se usa Zinc debido a su continuo crecimiento y su bajo costo a la hora de brindar protección a la corrosión

- La agitación del electrolito.
- El PH del electrolito debe estar entre 12 y 14.
- La temperatura del electrolito tanto para el proceso estático como para dinámicos debe ser de $26 \pm 1^\circ \text{C}$.
- La conductividad del electrolito depende del contenido de ion (zinc metal) que es de 10-11 y de la soda cáustica (hidróxido de carbono) que es de 17-20.

Teniendo el ánodo (zinc de alta pureza 99.9%) y un cátodo (en este caso el tornillo), a un amperaje y una temperatura determinada durante un tiempo estricto, el ánodo se disuelve en el electrolito y este se adhiere al cátodo (tornillo).

A los tornillos después de salir del baño galvánico, se les agrega un elemento de pasivado como fin del proceso para aumentar la resistencia a la corrosión. La tonalidad de los pasivadores más comunes son:

- Tonalidad azul: Con una alta resistencia a la corrosión con 96 horas de cámara salina y un espesor de 15 micras.

- Tonalidad Irisada: Con una resistencia a la corrosión con 120 horas de cámara salina y un espesor de 15 micras.

Este proceso tiene como medida reguladora la norma ICONTEC 2150 la cual sirve como guía para identificar las propiedades que debe tener el acabado superficial de acuerdo a la condición de servicio¹⁴.

El recubrimiento debe estar de acuerdo con las cuatro clases de espesor definidas en la tabla 8.

Tabla 8. Requisitos de resistencia a la corrosión

Número de clasificación y sufijo de clasificación	Condiciones de servicio	Espesor mínimo μM
Fe / Zn 25	MS4 (Muy severo)	25
Fe / Zn 13	S3 (Severo)	13
Fe / Zn 8	M2 (Moderado)	8
Fe / Zn 5	L1 (Liviano)	5

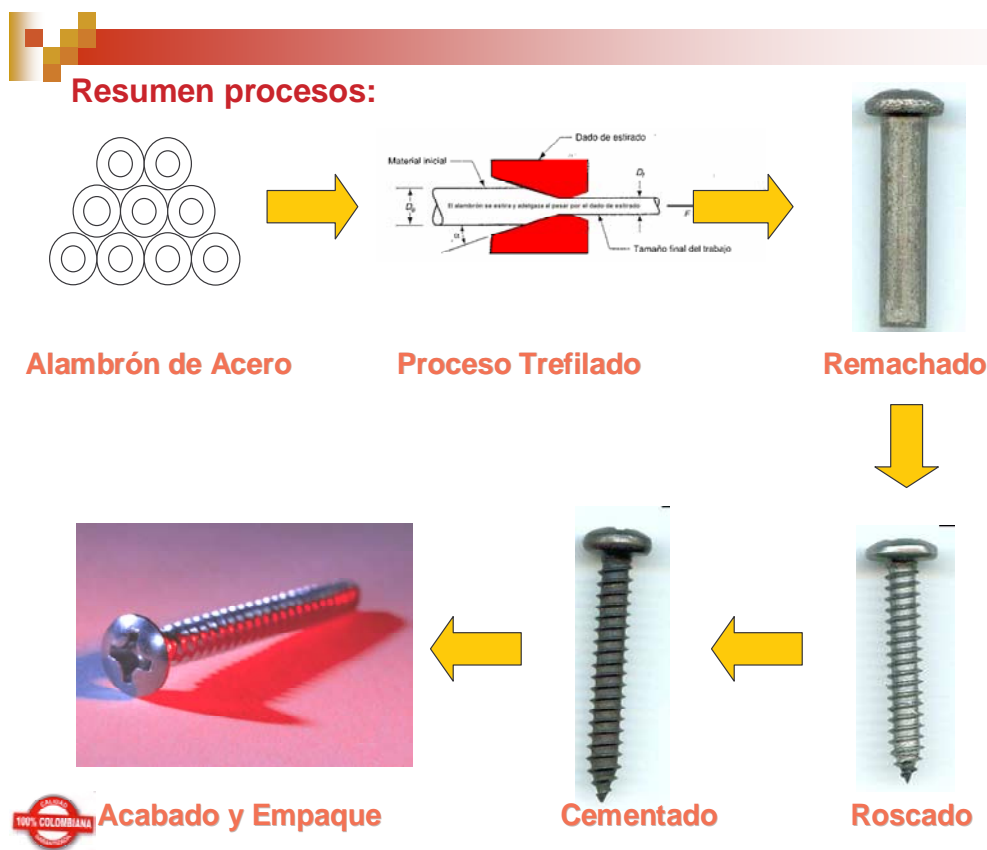
NORMA COLOMBIANA ICONTEC 2150, P 1.

En este punto el tornillo ya esta listo para ser empacado y despachado según las cantidades requeridas por el cliente. El cliente puede ser un distribuidor o mayorista, como también puede ser el usuario final, que en el caso de Industrias Cato es la gran Industria, con empresas como CHALLENGER, COLCERAMICA y HACEB.

¹⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Recubrimientos electrolíticos con cinc en hierro y acero. Santafé de Bogotá, DC: ICONTEC ,1986. P. 4. NTC 2150.

La figura 16 muestra un resumen de los procesos en la fabricación de tornillos autorroscantes.

Figura 16. Resumen de procesos



4. SEGUIMIENTO DE LOS CAMBIOS ESTRUCTURALES DE LA MATERIA PRIMA EN LA FABRICACIÓN DE TORNILLOS AUTORROSCANTES.

Como se explicaba en la sección 3.5.1., el material para fabricar tornillería debe acatar unos requisitos básicos, para cumplir con unas variables necesarias tanto para la fabricación del tornillo como el desempeño del mismo. A continuación se realizará un análisis de fase y tamaño de grano del material con el que se fabrican tornillos en acero.

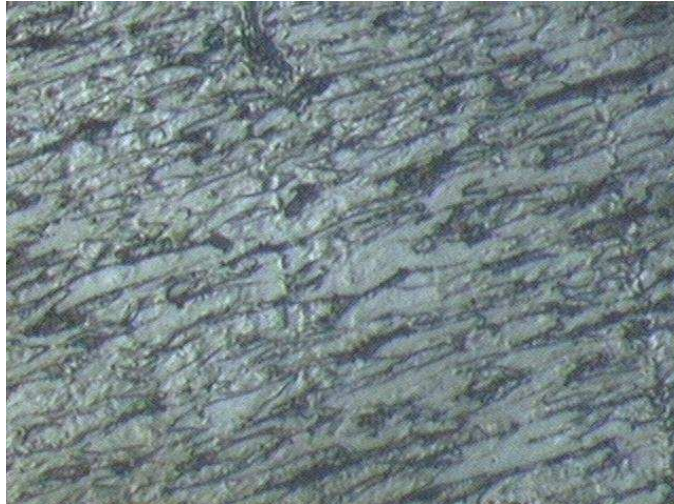
4.1 MATERIAL DE ACERO 1018 DESPUÉS DE SER TREFILADO.

Después de que se trefila el alambre, con el que se fabricará la tornillería este debe llevar un tratamiento térmico de recocido con el fin de esferoidizar la cementita de la perlita que se encuentra tanto en el núcleo como en la superficie, la cual dificultará la conformación en frío.

Se tomó una muestra de la planta de trefilación de Industrias Cato, ubicada en el norte del Cauca, en el municipio de Villa Rica. Esta muestra, fue extraída de un alambre después de ser trefilado de 5.5 mm a 3.32 mm en cuatro pasos, antes de ser recocido.

Las muestras fueron analizadas en el microscopio marca Advanced Optical, modelo XJL-17AT, metalúrgico.

Figura 17. Muestra del núcleo x 200 atacada con nital al 2%



La micrografía de la figura 17 muestra un tamaño de grano de 9 y su fase es de ferrita más perlita. La perlita, con un porcentaje de un 17.5%.

Figura 18. Muestra de la superficie x 100 atacada con nital al 2%



La micrografía de la figura 18 anterior, también fue tomada antes del tratamiento térmico de recocido y muestra el grano en el sentido de la trefilación.

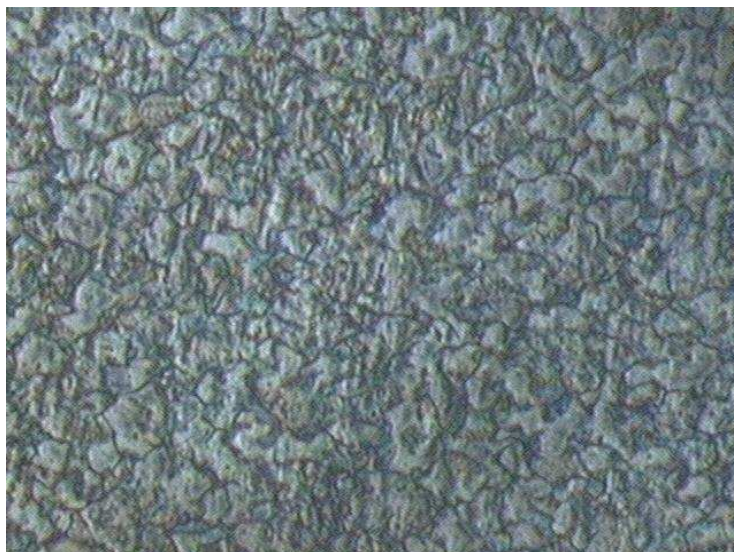
Las muestras de alambre antes de la conformación en frío, pertenecen al alambrón importado por Industrias Cato para la producción de tornillos.

Esta muestra fue llevada a la fase de recrystalización a 700° C, que es la temperatura en la cual los granos recuperan sus propiedades mecánicas y su forma inicial, por medio del tratamiento térmico de recocido.

La temperatura de recocido fue a 700° C durante 7 horas, de las cuales 3 horas fueron de calentamiento y las 4 restantes fueron de sostenimiento. El enfriamiento posterior fue durante 16 horas.

La micrografía de la figura 19, muestra el resultado del recocido en el material.

Figura 19. Núcleo, sección circular x 200 atacado con nital al 2%



La micrografía anterior muestra un tamaño de grano de 8, contra un 7.5 en la superficie de la misma muestra que se aprecia en la figura 21. Comparando el núcleo con la superficie, hay un leve crecimiento de grano, no hay decarburación y no hay exceso de cementita (perlita) en los límites del grano. Su fase es de ferrita más cementita; es globular en un 95% dispersa en la matriz (grano de ferrita).

Figura 20. Superficie, sección circular x 50 atacado con nital al 2%



La micrografías de las figuras 10 y 20 anteriores muestran un acero bien recocido, y tiene las mismas características descritas por Billigmann / Feldmann, en el libro Estampado y prensado a máquina.

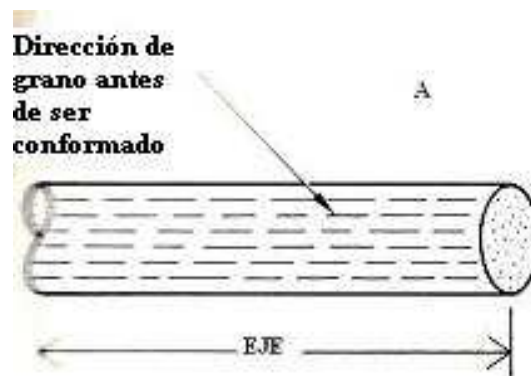
El siguiente paso después de tener el acero trefilado, es la conformación en frío del alambre para primero dar la forma del tornillo y segundo formar las roscas.

4.2 MUESTRA DEL MATERIAL DESPUÉS DEL PROCESO DE REMACHE.

El siguiente paso después de tener el acero trefilado, es la conformación en frío del alambre para primero dar la forma del tornillo y segundo formar las roscas.

La figura 21 representa la forma o dirección de orientación de los granos en un blanco de alambre antes de ser conformado.

Figura 21. Dirección del grano en un blanco de alambre.

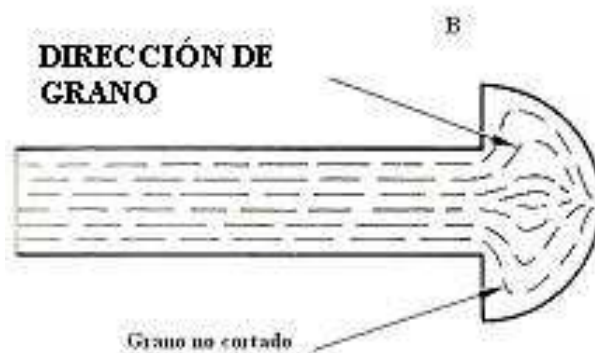


THE Heading Story by Waterbury farrel, Division of Textron, Inc.

En la figura 21 se pueden observar las líneas punteadas representan las moléculas del material, y como se puede ver tienden a seguir el eje del blanco. Esta tendencia es un resultado de los diferentes procesos de laminación y trefilado usados para convertir los lingotes de material crudos en alambre. La estructura de grano le añade fuerza, muy parecido a la estructura de grano en un pedazo de madera.

En la figura 22 vemos, un remache después de ser conformado en frío. El metal se le ha hecho para que fluya a lo largo del eje del blanco mientras la estructura de grano es cambiada en el proceso, siguiendo el contorno de la parte.

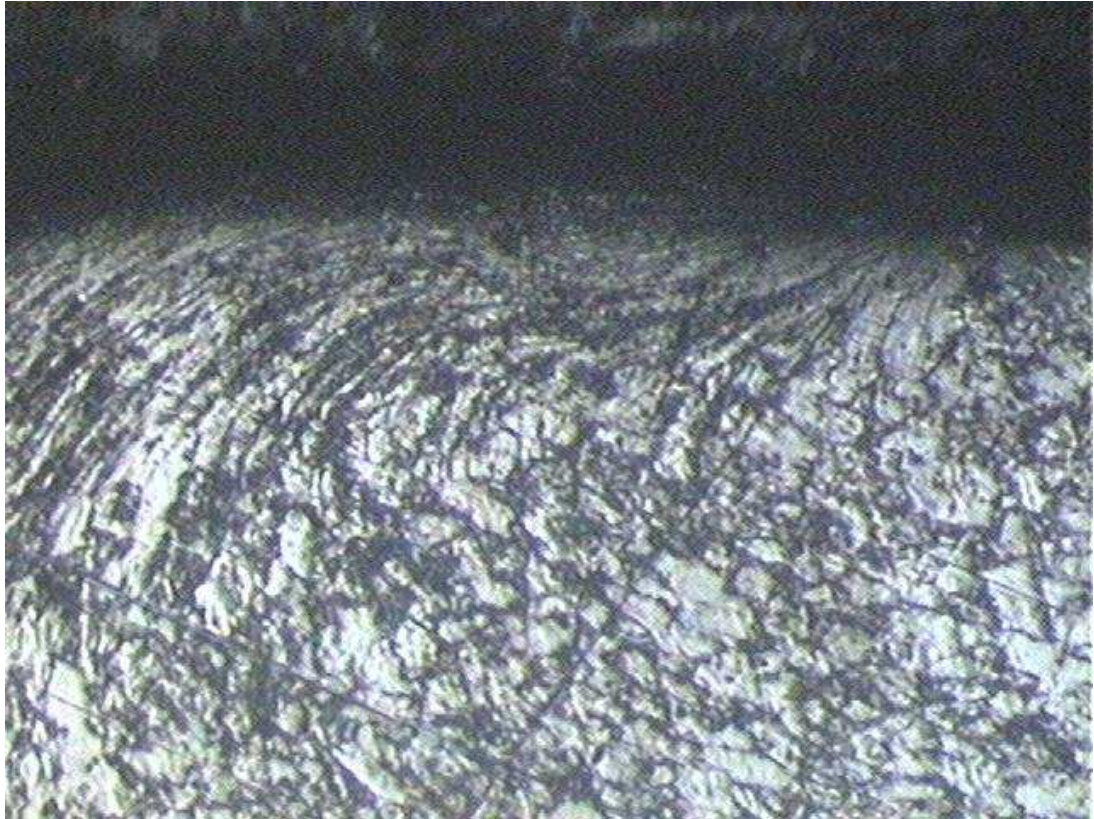
Figura 22. Dirección del grano del acero después de ser conformado



THE Heading Story by Waterbury farrel, Division of Textron, Inc.

Al tomar una muestra que pertenecen al proceso de producción de tornillería de Industrias cato, hacen parte de la orden de fabricación No 44854 de un tornillo autorroscante 8 x $\frac{3}{4}$ CC PH, la cual se muestra en la figura 23.

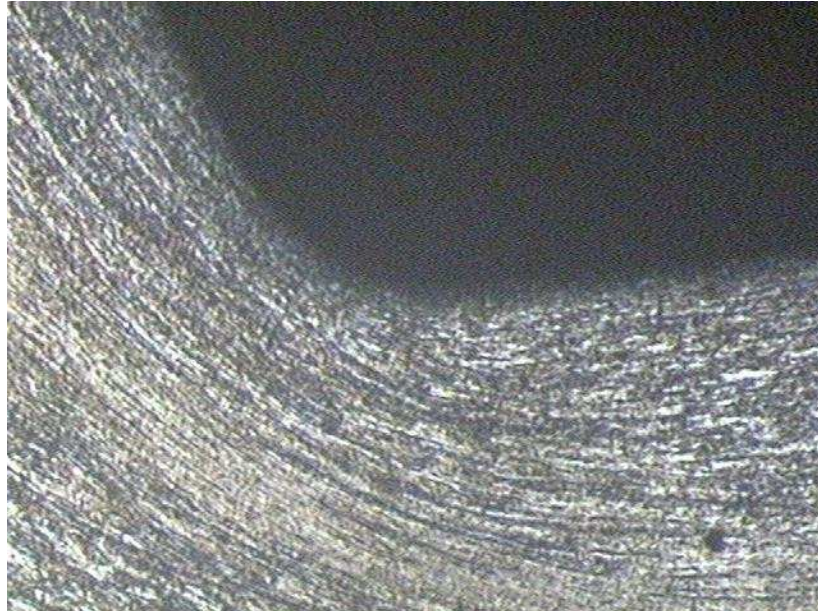
Figura 23. Superficie de la cabeza x 50 atacado con nital al 2%



La figura 23 muestra la orientación de los granos del tornillo, después de que se formo la cabeza en el proceso de remachado.

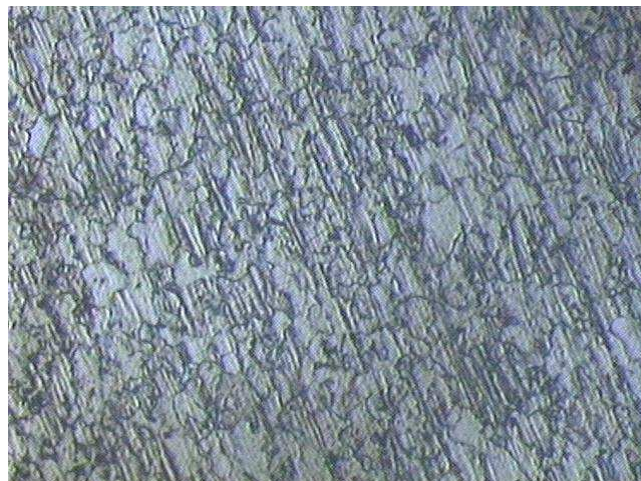
En la figura 24 se muestra la micrografía enfocada en la parte inferior de la ranura del tornillo, con el fin de mostrar la dirección del grano.

Figura 24. Parte inferior de ranura del remache x 50 atacado con nital al 2%



En la siguiente figura se puede apreciar la dirección del grano en el núcleo.

Figura 25. Dirección del grano en el núcleo del vástago del tornillo atacado con nital al 2%



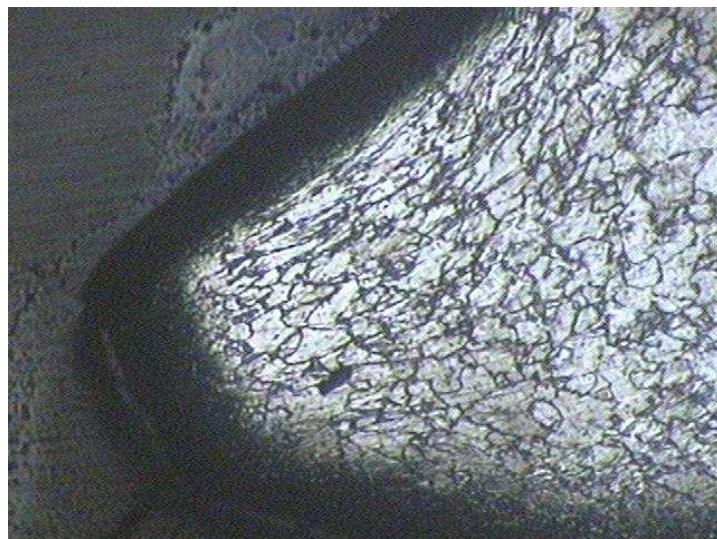
De la micrografía de la figura 25 se puede resaltar que el tamaño de grano en el núcleo es de 8 y su fase es de ferrita más perlita. No hay decarburación, y al igual

que las muestras del alambre después del recocido no hay excesos de cementita en los límites del grano.

4.3 MUESTRA DEL MATERIAL DESPUÉS DEL PROCESO DE ROSCADO.

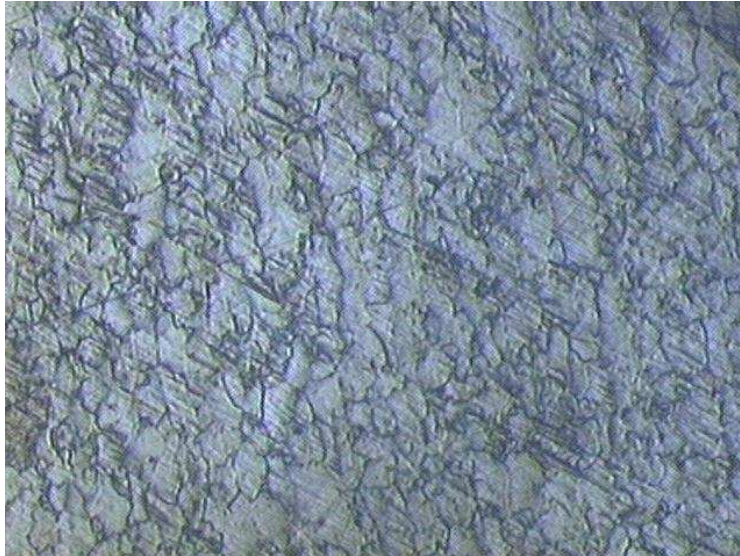
En la micrografía de la figura 26 se puede ver como el grano adquiere la forma de la superficie del primer filete de trabajo del tornillo autorroscante.

Figura 26. Primer filete de trabajo de un tornillo autorroscante x 50 atacado con nital al 2%



Después del proceso de rosca, la muestra aun presenta el mismo tamaño de grano de 7.5 en la superficie, y 8 en el núcleo como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 27. Muestra del núcleo del tornillo con rosca x 50 atacado con nital al 2%.



No hay decarburación, y al igual que las muestras del alambre después del recocido y del remache no hay excesos de cementita en los límites del grano.

Después de este proceso su fase sigue siendo ferrita + cementita, con matriz ferrítica, cementita globular difusa en un 95% con tendencia en los límites de grano (forma circular).

4.4 MUESTRA DEL TORNILLO DESPUÉS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE CEMENTADO.

Como se describió en el marco teórico, los tornillos autorroscantes deben llevar un tratamiento térmico de cementación, consistiendo en aumentar el contenido de carbono en la superficie al aumentar la temperatura del tornillo en un horno de cementación, a la zona de austenización.

En la micrografía de la figura 28 se puede ver como después de la cementación, el primer filete de trabajo, ahora presenta una capa de cementación, con un espesor de capa de 0.2 mm (0.0079 pulgadas), cumpliendo con lo especificado para un tornillo autorroscante calibre número 8 en la tabla 6 del marco teórico, sección proceso de cementación, dato tomado de la norma SAE J933.

Partiendo del espesor de la capa cementada, con la ecuación 12, logramos obtener el tiempo que debe durar la temperatura de sostenimiento.

$Espesor = 660 \bullet e^{-8287/T} \bullet \sqrt{t}$, por lo tanto la ecuación quedaría así:

$$t = \left(\frac{Espesor}{660 \bullet e^{-8287/T}} \right)^2$$

Si el espesor es de 0.2 mm, y la temperatura de sostenimiento es de 925°C, el tiempo de sostenimiento es:

$$T = Celsius + 273$$

$$t = \left(\frac{0.2}{660 \bullet e^{-8287/1198}} \right)^2$$

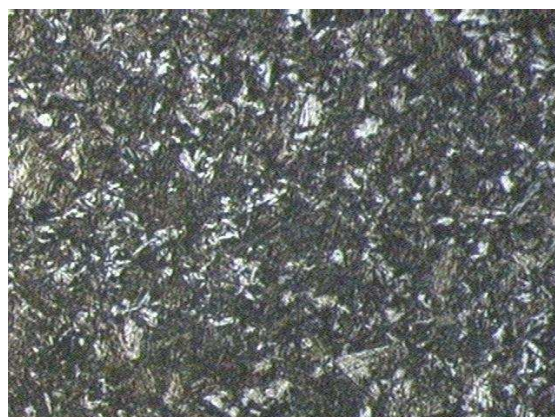
El tiempo t en horas es de 0.306 horas, que en minutos equivale a 18 minutos.

Figura 28. Primer filete del tornillo cementado x 50 atacado con nital al 2%



En la figura 29 se puede apreciar como en el núcleo ahora es martencítico. Este cambio sucedió mientras se realizaba el enfriamiento a alta velocidad, con la característica de que no hay cambio de fase.

Figura 29. Núcleo después de cementado x 50 atacado con nital al 2%



En la figura 30 se puede apreciar, la parte inferior de la ranura del tornillo, es esta se puede observar que solo hubo cambio de fase en la superficie del tornillo,

después del cementado. De esta manera microscópicamente se puede apreciar que se realizó un buen proceso de cementación.

Figura 30. Ranura del tornillo después del cementado x 50 atacado.



5. ANÁLISIS PARA TORNILLOS AUTORROSCANTES

Los tornillos autorroscantes o tornillos lámina, hacen parte de un gran mercado, tanto para la producción nacional, como para los grandes importadores de tornillería, estimando que las ventas de tornillería que se hacen en el país están en un 20%.

Esta importaría no se ve reflejada en los textos especializados en diseño de tornillos, o elementos de fijación, ya que no nombran que ocurre con estos tornillos, en el momento en que están produciendo su propia rosca. Pero los elementos recogidos en varios textos, y descritos en el marco teórico, son base para avanzar en este tema.

Para el planteamiento de análisis, se escogió un tornillo autorroscante calibre No 8, con las siguientes características y medidas comerciales que aparece en la tabla 9 y en la figura 32.

Tabla 9. Características del tornillo Autorroscante

Tipo de cabeza	Tipo de rosca	Norma
Pan Phillips (Cilíndrica)	AB	ANSI 18.B.6.4

Las medidas del tornillo están en unidades métricas, y con estas medidas se desarrollaran los cálculos para encontrar las cargas y los diferentes esfuerzos.

El plano del tornillo autorroscante se muestra en la figura 31:

Figura 31. Tornillo Autorroscante 8 x 1/2 CC PH

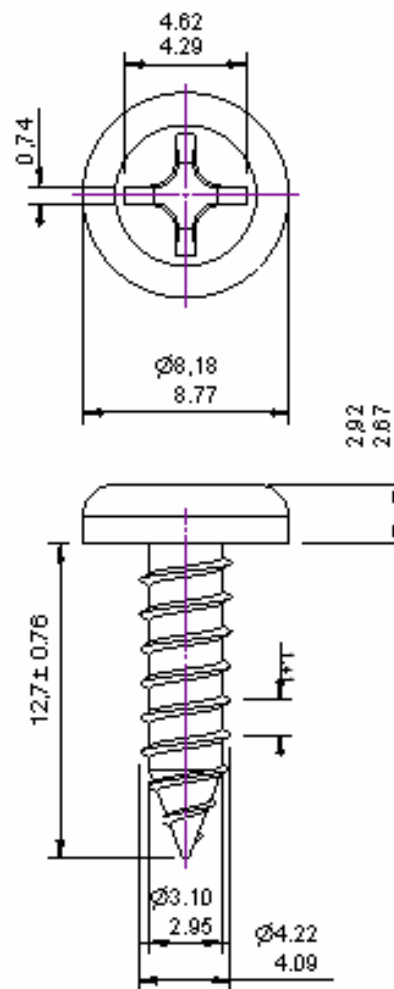


Figura tomada de catalogo de productos de Industrias cato S.A. Unidades en mm.

5.1. PRUEBA DE LÁMINA.

Para analizar los esfuerzos en los tornillos autorroscantes, como primera medida se debe tener en cuenta, la fuerza que ejerce el material directamente sobre el primer filete que hará trabajo cuando se forma la rosca mientras penetra el material.

Para este análisis se tomará como ejemplo la prueba de calidad de lámina, que se le realiza a los tornillos autorroscantes para comprobar si se hizo un buen tratamiento térmico.

Esta prueba de calidad, indica que se debe ingresar el tornillo en un agujero indicado y a un espesor de placa previamente seleccionado, el cual muestra en la tabla 10:

Tabla 10. Espesor de placa estándar y tamaño de agujero

Nominal Screw Size	Thickness					Hole Size											
	Types AB, A, B, BP, and C			Types D, F, G, and T		Type A		Types AB, B, and BP		Type C				Types D, F, G, and T			
	Gage	Max	Min	Max	Min	Drill Size	Hole Dia	Drill Size	Hole Dia	Drill Size	Hole Dia	Drill Size	Hole Dia	Drill Size	Hole Dia	Drill Size	Hole Dia
1	18	0.0500	0.0460	0.0800	0.0760	#48	0.0760	#48	0.0760	#48	0.0760	#48	0.0760	#49	0.0730	...	...
3	18	0.0500	0.0460	0.0960	0.0920	#46	0.0810	#46	0.0810	#44	0.0860	#43	0.0890	#46	0.0810	...	...
1	18	0.0500	0.0460	0.1110	0.1070	#44	0.0860	#44	0.0860	#41	0.0960	#40	0.0980	#41	0.0960	...	...
5	18	0.0500	0.0460	0.1110	0.1070	#36	0.1065	#36	0.1065	#35	0.1100	#35	0.1100	#37	0.1010	...	...
6	14	0.0770	0.0730	0.1425	0.1385	#32	0.1160	#32	0.1160	#31	0.1200	1/8	0.1250	#31	0.1200	...	...
7	14	0.0770	0.0730	...	...	#30	0.1285	#30	0.1285	...	...	...	...	...	...	...	...
8	14	0.0770	0.0730	0.1420	0.1380	#29	0.1360	#29	0.1360	#27	0.1440	#26	0.1470	#26	0.1470	...	...
10	1/8	0.1270	0.1230	0.1905	0.1845	#21	0.1590	#21	0.1590	#19	0.1660	11/64	0.1719	#17	0.1730	#16	0.1770
12	1/8	0.1270	0.1230	0.1905	0.1845	3/16	0.1875	3/16	0.1875	#11	0.1910	#10	0.1935	#8	0.1990	...	...
14	1/8	0.1270	0.1230	...	...	5.5 mm	0.2165	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1/4	3/16	0.1905	0.1845	0.2530	0.2470	...	...	5.5 mm	0.2165	7/32	0.2188	1	0.2280	1	0.2280	A	0.2340
16	3/16	0.1905	0.1845	...	...	B	0.2380	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18	3/16	0.1905	0.1845	...	...	G	0.2610	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5/16	3/16	0.1905	0.1845	0.3155	0.3095	...	...	I	0.2720	J	0.2770	L	0.2900	L	0.2900	M	0.2950
20	3/16	0.1905	0.1845	...	...	L	0.2900	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24	3/16	0.1905	0.1845	...	...	11/32	0.3438	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3/8	3/16	0.1905	0.1845	0.3780	0.3720	...	...	21/64	0.3281	R	0.3390	11/32	0.3438	T	0.3580	T	0.3580
7/16	3/16	0.1905	0.1845	...	...	...	...	13/32	0.4062	...	...	...	...	...	...	...	...
1/2	3/16	0.1905	0.1845	...	...	...	...	15/32	0.4688	...	...	...	...	...	...	...	...

INDUSTRIAL FASTENER INSTITUTE. Inch Fastener Standards, 7th Edition, February 2003, ASME B 18.6.4 de 1998

Según la tabla 10 para un tornillo autorroscante tipo AB calibre 8, la broca que se debe utilizar es de 3.4 mm, para un diámetro máximo y mínimo de agujero de 3.43 mm (0.135 pulgadas) y 3.48 mm (0.137 pulgadas) respectivamente. Con una placa de espesor entre 1.96 mm (0.077 pulgadas) y 1.86 mm (0.073 pulgadas). Esta placa debe de ser de acero de bajo carbono, cold rolled y una dureza mínima de 70 HRB y no máxima a 85 HRB¹⁵.

En esta prueba se usan placas con un contenido de carbono de 0.20%.

En la figura 32 se describe la prueba:

Figura 32. Prueba de lámina para tornillos autorroscantes



Prueba realizada en las instalaciones de Industrias cato S.A.

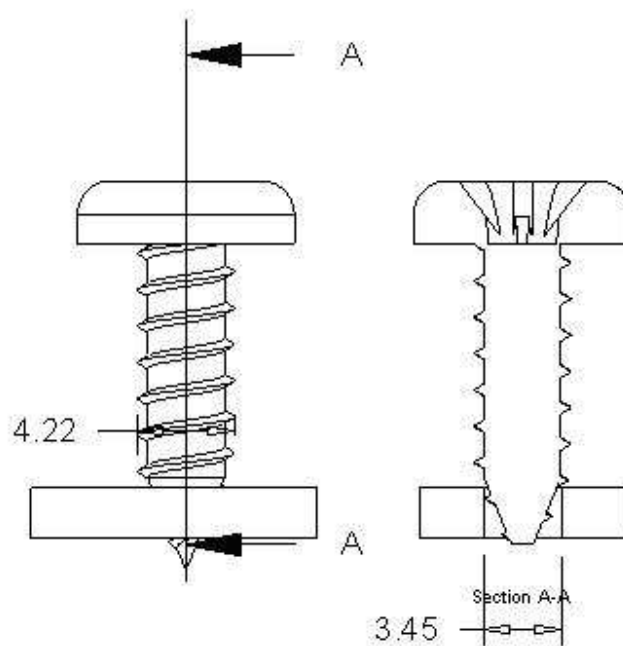
Antes de introducir el tornillo la placa tiene un diámetro inicial de 3.45 mm, el cual llega hasta la medida máxima del diámetro nominal del tornillo calibre 8, el cual es de 4.22 mm.

Durante el cambio de diámetro que sufre el agujero de la placa, ocurre corte de material, y deformación al haber remoción de material (placa). Para nuestro análisis, solo se consideró el efecto de desplazamiento de material sobre la placa, no se considero la deformación producida por la cresta en el momento de formar la rosca.

¹⁵ INDUSTRIAL FASTENER INSTITUTE, Inch Fastener Standards. Ob. citada. Pag H-24.

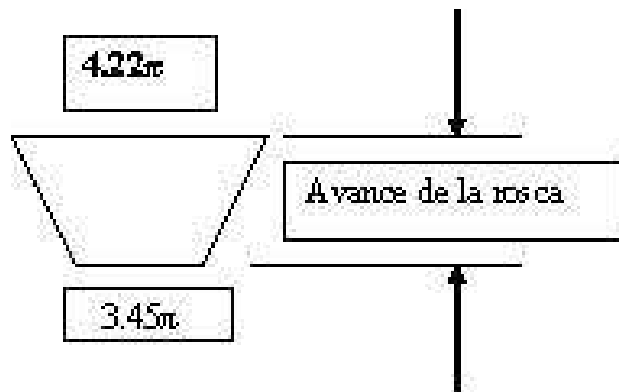
La siguiente figura muestra la diferencia entre agujeros, en el antes y después, de introducir el tornillo en la placa mientras forma su propia rosca.

Figura 33. Diferencia de diámetros



El desarrollo de esta diferencia de diámetros queda como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Desarrollo de los diámetros



Si se toma el desarrollo no como un trapecio, sino como un rectángulo, la base del rectángulo sería el diámetro de agujero final por pi, y la altura seguiría siendo el avance de la rosca del tornillo, también conocido como paso de la rosca. El área de este rectángulo, define el área deformada en el agujero de la placa en una revolución del tornillo autorroscante.

Para este caso en particular el área deformada equivale a:

$$A_p = 18.71 \text{ mm}^2$$

La lámina al sufrir una deformación plástica debido a que el tornillo produce su propia rosca, tendrá un endurecimiento por deformación por lo que el esfuerzo está definido por:

$$\sigma = K \epsilon^n = \frac{F}{A} \quad (13).$$

Donde K es el coeficiente de resistencia y n se le conoce como exponente de endurecimiento por deformación. El valor de F equivale a la carga aplicada y A es el área instantánea de deformación. Los valores típicos para K y n son obtenidos de del libro de Groover¹⁶ y son 500 MPa y 0.25 respectivamente.

El factor ϵ se conoce como la deformación real y se puede relacionar con la deformación ingeniería según la siguiente expresión:

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (14).$$

Donde el valor de e para un acero SAE 1020, tiene un valor de valor de 0.18, por lo tanto el valor de la deformación real es de¹⁷:

$$\epsilon = 0.165$$

El valor del esfuerzo real es de:

$$\sigma = 318.66 N / mm^2$$

De la ecuación 13 podemos obtener el valor de la fuerza aplicada para deformar el material sabiendo que el valor de A es 18.71 mm²:

$$F = 5962.13 \text{ Newton.}$$

¹⁶ GROOVER, Mikell P. Fundamentos De Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. Naucalpan de Juarez: Prentice Hall, 1997. p. 51.

¹⁷ GTZ, Tablas para la industria metalúrgica. Barcelona: Reverte S.A, 1984. p. 11.

El valor de la fuerza F , equivalente para deformar la sección del agujero. Esta fuerza actúa en el sentido normal de la arista. Por lo tanto:

$$N = 5962.13 \text{ Newton.}$$

En la sección 3.2 se conoce que la componente de la fuerza normal que actúa sobre el plano inclinado es $N \cos 30^\circ$, por lo tanto:

$$N \cos 30^\circ = 5163.3 \text{ Newton.}$$

De la ecuación 1, para los tornillos autorroscantes al tener el paso igual al avance, se obtiene un valor λ de:

$$\lambda = 6.1$$

Recordando las ecuaciones 2 y 6, entonces se obtiene:

$$F = 1062.1 \text{ Newton.}$$

$$P = 4722.4 \text{ Newton.}$$

Donde F es la fuerza de aplicación del torque, y P es la fuerza axial, que transmite el torque sobre el tornillo. Por lo tanto de la ecuación 6 obtenemos:

$$T = 2241.03 \text{ N} \cdot \text{mm} = 19.83 \text{ lb} \cdot \text{pulgada.}$$

5.2 ESFUERZO DE TORSIÓN Y AXIAL EN LOS TORNILLOS LÁMINA CON UN TORQUE TEÓRICO.

Después de obtener los datos teóricos de cargas aplicadas y un torque aplicado para deformar el material que esta siendo roscado, se pueden obtener los valores de esfuerzos cortantes de torsión y el esfuerzo axial, que se presentan en el tornillo.

Según la ecuación 11 el valor de torque es:

$$\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d_r^3}$$

Donde T es igual a 2241.03 Newton * mm, y dr máximo según la figura 32 es igual a 3.1 mm. Según esto el valor del esfuerzo de torsión es:

$$\tau = 383 \frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$$

Para el valor del esfuerzo axial, se usa la ecuación 7, la cual describe área de sección transversal donde ocurrirá el esfuerzo axial.

$$A = 0.7854d_r^2$$

Donde dr según la figura 32 es igual a 3.1 mm. Entonces A es igual:

$$A = 7.55\text{mm}^2$$

Teniendo el valor del área, la ecuación 12 que describe el esfuerzo axial es:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_t}$$

Donde F es igual a la carga axial producida por el torque, que para el valor teórico de torque de 1745 Newton * mm, es igual a 5079.2 Newton.

Entonces el valor del esfuerzo axial es igual a:

$$\sigma_t = 625.5 \frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$$

Con los valores de σ_t y τ obtenidos en los cálculos anteriores, y despejando dichos valores en la ecuación 13, obtenemos el valor de:

$$\sigma_1 = 1120 \frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_2 = 131.03 \frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$$

Estos valores se reemplazan en la ecuación 14 para hallar el valor del esfuerzo según el criterio de Von mises, el cual es:

$$\sigma_e = 1060 \frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$$

Los valores anteriores, son datos obtenidos teóricamente, y que en el desarrollo del proyecto, serán comparados con datos experimentales.

5.3 ESFUERZO DE TORSIÓN Y AXIAL EN LOS TORNILLOS LÁMINA CON UN TORQUE EXPERIMENTAL.

Para saber cual es el esfuerzo de torsión experimental, primero se debe conocer el torque de aplicación. Para esto se hizo una prueba experimental, en la misma placa donde se hace la prueba de calidad de tratamiento térmico.

Primero se fijo una placa, con las mismas características aplicadas para hallar la fuerza cortante. Se ingresaron 10 tornillos autorroscantes 8 x 1/2 CC PH, en 10 agujeros con el diámetro en la mínima medida que es 3.43 mm y 10 tornillos de la misma referencia, en 10 agujeros con el diámetro máximo que es de 3.48 mm, y se registraron los siguientes datos que aparecen en la tabla 11:

Tabla 11. Torques de aplicación en tornillos lámina calibre No 8

DIÁMETRO DE AGUJERO MINIMO 3.43 mm	DIÁMETRO DE AGUJERO MAXIMO 3.48 mm	TORQUE DE APLICACIÓN Lb x pulg.
19	16	
20	15	
18	16	
20	16	
17	16	
18	16	
20	16	
18	16	
19	16	
18	16	
18.7	15.8	MEDIA Lb x Pulg

Datos obtenidos con una llave de torque calibrada, marca snap – on, modelo TEC – 12 FUA, tipo reloj, con un rango de exactitud de $\pm 2\%$ a la derecha de la aguja y $\pm 2\%$ a la izquierda de la aguja.

El promedio entre estos dos resultados nos da 17.25 lb*pulg, que en el sistema métrico equivale a 1948.98 Newton*mm.

Este dato es similar y aproximado al hallado teóricamente con base en los cálculos de torque de los tornillos, lo cual le da veracidad al análisis.

Como se menciona en el capítulo 3, esfuerzo a torsión en los tornillos, se analiza en su diámetro menor d_r , tal como se describió en la ecuación 11.

$$\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d_r^3}$$

Si el máximo valor del diámetro menor de rosca de los tornillos calibre 8, es 3.10 mm y el valor de torque es 1948.98 Newton*mm, entonces el valor del esfuerzo a torsión es de:

$$\tau = 333.2 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Para hallar la fuerza de aplicación para producir el torque por el torque, se recurre a la ecuación 6 entonces:

$$F = 923.7 \text{ Newton}$$

$$P = 4107.8$$

Donde P es la fuerza axial, que transmite el torque sobre el tornillo. Reemplazando el valor de P en la ecuación 12, teniendo en cuenta que A es igual a 7.55 mm^2 , entonces el esfuerzo axial es igual a:

$$\sigma_t = 544 \frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$$

Con los valores de σ_t y τ obtenidos en los cálculos anteriores, y despejando dichos valores en la ecuación 13, obtenemos el valor de:

$$\sigma_1 = 974.12 \frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_2 = 114 \frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$$

Estos valores se reemplazan en la ecuación 14 para hallar el valor del esfuerzo máximo según el criterio de Von mises, el cual es:

$$\sigma_e = 922.42 \frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$$

Los valores anteriores, son datos obtenidos teóricamente, y que en el desarrollo del proyecto, serán comparados con datos experimentales.

5.4 TORQUE MÁXIMO DE AJUSTE PARA LOS TORNILLOS LAMINA.

La norma ANSI B 18.6.4, también habla de una prueba de torsión que se les hace a los tornillos autorroscantes¹⁸. En esta prueba al tornillo se le aplica un torque de ajuste, y este es medido por medio de una llave de torque. La norma exige los siguientes datos que se muestran en la tabla 12:

Tabla 12. Torque mínimo requerido

Nominal Screw Size	Minimum Torsional Strength, lb. - in.			
	Type A	Types AB, B, BF, BP, and BT	Types C, D, F, G, and T	
			Coarse Thread	Fine Thread
2	4	4	5	6
3	9	9	9	10
4	12	13	13	15
5	18	18	18	20
6	24	24	23	27
7	30	30	...	...
8	39	39	42	47
10	48	56	56	74
12	83	88	93	108
14	125	...	...	...
1/4	...	142	140	179
16	152	...	...	...
18	196	...	...	...
5/16	...	290	306	370
20	250	...	...	...
24	492	...	...	...
3/8	...	590	560	710
7/16	...	620	700	820
1/2	...	1020	1075	1285

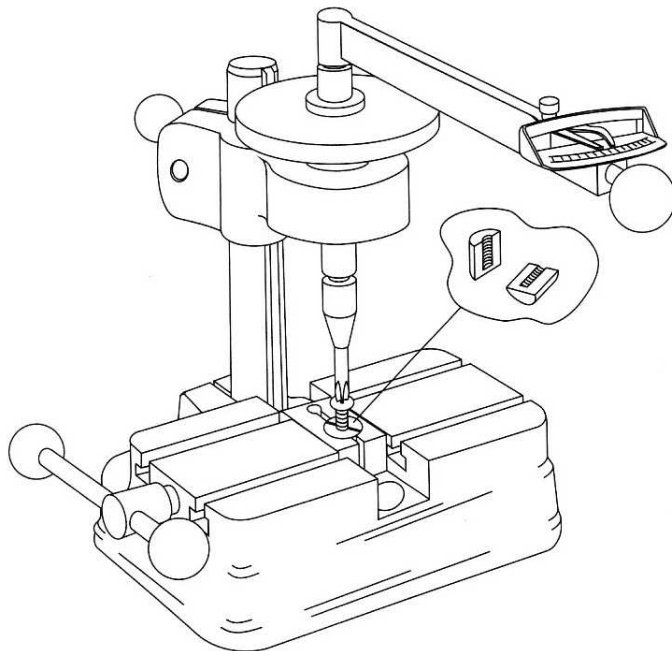
INDUSTRIAL FASTENER INSTITUTE. Inch Fastener Standards, 7 Ed.

¹⁸ Industrial Fastener Institute. Inch Fastener Standards, 7 ed. Cleveland: IFI, 2003. p. H-24.

El torque descrito en la tabla anterior, corresponde al torque mínimo que debe resistir el tornillo para el fabricante, y a su vez el máximo que le debe de aplicar el usuario final.

La figura 35 muestra como se hace esta prueba:

Figura 35. Prueba de torque



INDUSTRIAL FASTENER INSTITUTE. Inch Fastener Standards, 7 Ed.

Se realizó una prueba de torque de ajuste con 10 tornillos autorroscantes calibre 8x1/2, cabeza cilíndrica phillips, con el objetivo de saber el torque bajo el cual el tornillo fallaba:

Tabla 13. Torque de ajuste al cual falla el tornillo

Intentos	Tornillo Calibre 8 x ½ CC PH ZN
55	TORQUE DE APLICACIÓN Lb x Pulg
54	
55	
56	
55	
56	
55	
55	
55	
54	
55	MEDIA Lb x Pulg

Datos obtenidos con una llave de torque calibrada, marca snap – on, modelo TEC – 12 FUA, tipo reloj, con un rango de exactitud de ± 2% a la derecha de la aguja y ± 2% a la izquierda de la aguja.

El torque de ajuste bajo el cual los tornillos fallaron fue 55 lb x pulgada, 6294 N*mm.

Recordando que el esfuerzo a torsión en los tornillos, se analiza en su diámetro menor d_r , tal como se describió en la ecuación 11.

$$\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d_r^3}$$

Si el máximo valor del diámetro menor de rosca de los tornillos calibre 8, es 3.10 mm y el valor de torque es 6294 Newton * mm, entonces el valor del esfuerzo a torsión es de:

$$\tau = 1076N / mm^2$$

Para hallar el esfuerzo axial producido por el torque, se recurre a la ecuación 6 entonces:

$$F = 2982.9 \text{ Newton}$$

$$P = 13263.4 \text{ Newton}$$

Donde P es la fuerza axial, que transmite el torque sobre el tornillo.

Reemplazando el valor de P en la ecuación 12, sabiendo que A es igual a 7.55 mm², entonces el esfuerzo axial es igual a:

$$\sigma_t = 1755.7 \frac{\text{Newton}}{mm^2}$$

Con los valores de σ_t y τ obtenidos en los cálculos anteriores, y despejando dichos valores en la ecuación 13, se obtiene el valor de:

$$\sigma_1 = 3144.4 \frac{\text{Newton}}{mm^2}$$

$$\sigma_2 = 367 \frac{Newton}{mm^2}$$

Estos valores se reemplazan en la ecuación 14 para hallar el valor del esfuerzo según el criterio de Von mises, el cual es:

$$\sigma_e = 2978 \frac{Newton}{mm^2}$$

Los valores anteriores, son datos obtenidos teóricamente, y que en el desarrollo del proyecto, serán comparados con datos experimentales.

6. RESULTADOS OBTENIDOS.

A continuación se mostrara un cuadro de resumen de los valores obtenidos en las pruebas anteriores:

Tabla 14. Resumen de valores obtenidos durante el análisis

Torque Newton * mm	Carga axial P Newton	Fuerza F del torque (newton)	Von mises Newton / mm²	Tipo de torque
2241.03	4722.45	1062.07	1060	Torque teórico
1948.98	4107.8	923.7	922.42	Torque real
6294	13263.4	2982.9	2978	Torque de falla

En la tabla 14 se puede apreciar, como el valor obtenido de torque teórico, aplicando las ecuaciones del marco teórico en las secciones 3.3 y 3.4, tienen una gran aproximación al valor de torque hallado experimentalmente. Este resultado de torque dio como resultado a unos valores de fuerza F y P, que también tienen aproximación a los valores reales, obtenidos a partir del torque real.

Este acercamiento entre los datos, da veracidad al planteamiento que se hizo, en la sección 5.1, donde se hablo sobre la fuerza que deforma el material, que en el plano inclinado que no es otra cosa que el desarrollo de una revolución de la hélice de la rosca del tornillo.

Un dato importante para el éxito del análisis, son los diferentes valores del torque para cada caso (teórico, real y falla).

Los datos obtenidos con el torque, por el cual fallo el tornillo, son mucho mayores, a los obtenidos en los otros dos casos. Esto pasa debido a que el torque con el cual fallo el tornillo, esta por encima del valor del torque que debe resistir este en la prueba de torsión que se describe en la sección 5.4 y se encuentran en la tabla 12 de la misma sección, para un tornillo calibre 8, el cual tiene un valor de 39 lb * pulgada o 4406 Newton * mm. Esto prueba que el tornillo con el que se hizo la prueba de torque, y del cual se obtuvo el valor de torque promedio con el que este fallo, obtuvo un buen tratamiento térmico.

Los resultados aunque tienen una diferencia, se aproximan a la realidad, como es el caso del tornillo sometido a un torque donde este falla, la parte experimental arrojo un resultado cuando a el tornillo se le rompe la cabeza, y en la simulación, aunque no se rompe se ve que hay desplazamiento de material, simulando una deformación del tornillo, producido por la cargas a las cuales este fue sometido.

En base a estos resultados, aunque se dieron para un calibre y una referencia del tornillo autorroscante especifica, se procederá a proponer un modelo para el análisis de tornillos autorroscantes.

7. PROPUESTA DE MODELO PARA ANALIZAR TORNILLOS AUTORROSCANTES

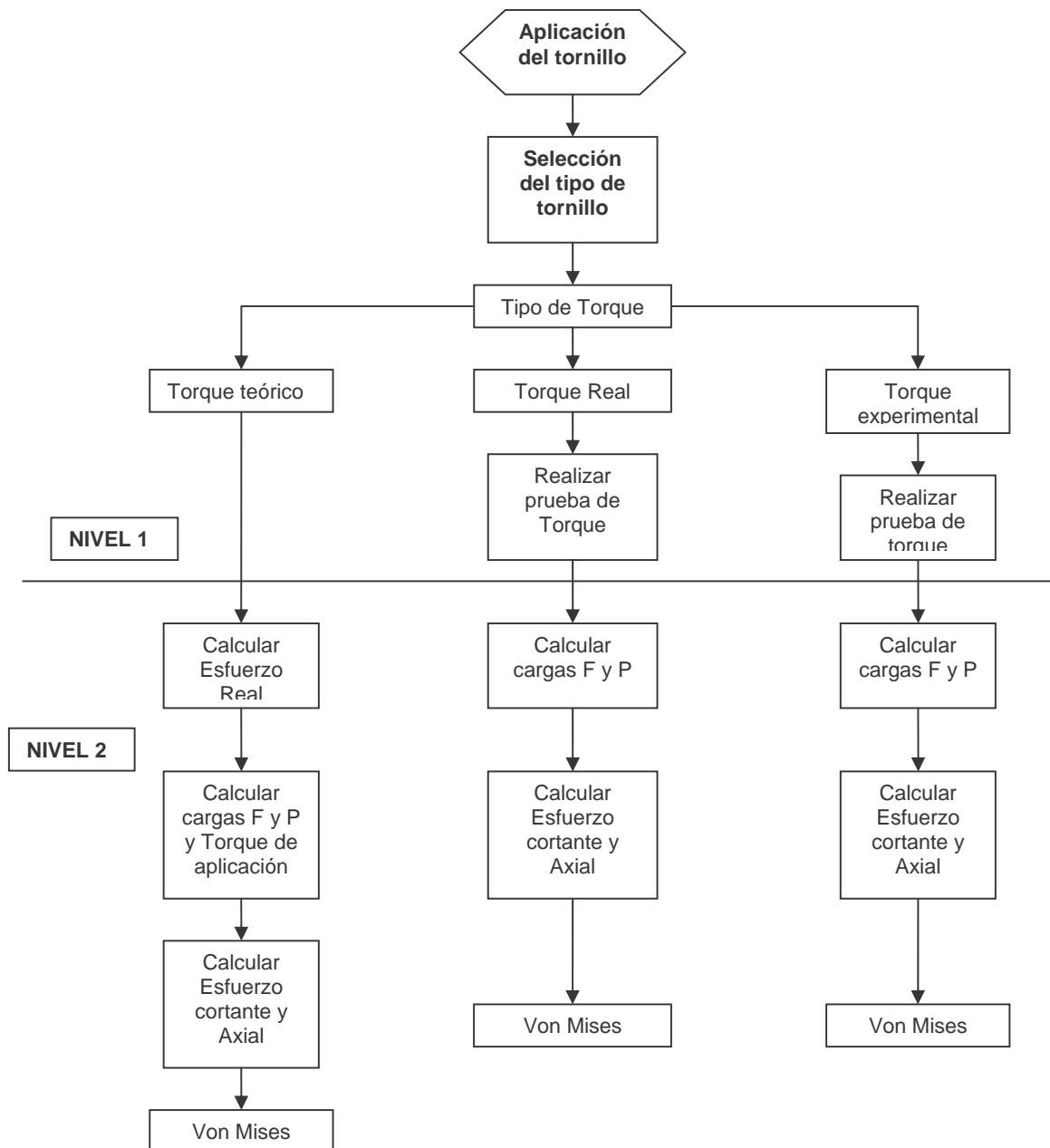
Después de todos los pasos realizados para poder obtener unos resultados, con el fin de ser analizados y confrontados unos con otros, se propone un modelo para analizar los tornillos autorroscantes, basándonos en las variables mas influyentes en el momento en que el tornillo realiza la función de formar su propia rosca mientras une uno o varios materiales.

El modelo puede variar de 3 formas: la primera es si no se conoce el valor del torque y no es posible calcularlo, la segunda es encontrar el valor del torque por medio de una prueba experimental y la tercera es la misma prueba experimental pero llevando el tornillo a que falle cuando ya esta totalmente introducido en la pieza a fijar.

De igual manera, las 3 diferentes formas llegan a un punto donde el fin es encontrar los esfuerzos según el criterio de Von Mises y el cual se podría comparar con un análisis en ALGOR o un software similar aplicando los valores de las cargas encontradas, por cálculos matemáticos en los 3 casos.

Por medio de un diagrama de flujo como se muestra como son los pasos en el modelo para analizar tornillos autorroscantes:

Figura 36. Modelo para el análisis de tornillos Autorroscante



La secuencia lógica para el análisis teórico es el siguiente:

- Lo primero que se debe de definir es la aplicación del tornillo.
- La geometría del tornillo, o selección del mismo es el paso a seguir donde los datos mas importantes para este análisis, son sus medidas de diámetro nominal (externo) y de raíz (interno), los cuales están definidos bajo la norma 18B.6.4 (ver anexo 1).
- En el caso de no poder encontrar el torque experimentalmente, se deben conocer propiedades del material a fijar tales como el coeficiente de resistencia (K), exponente de endurecimiento por deformación (n) y el porcentaje de alargadura. Además se debe saber el diámetro de agujero requerido para poder ingresar el tornillo (Ver anexo 2). Estos datos mas el diámetro final del agujero (diámetro del tornillo) servirán para encontrar el tamaño de la fuerza requerida para deformar el material, la cual va a tener una dirección normal a la superficie (Ver sección 5.1).
- A partir de la carga normal a la superficie del tornillo, se encontrara la carga requerida para realizar el torque que romperá la fuerza que se opone a la entrada del tornillo, y la carga axial que se produce por el torque aplicado (ver ecuaciones 2 y 3). De igual manera con la ecuación 6 se puede encontrar el valor del torque.
- Para encontrar el torque de forma experimental, se hará uso de un torquimetro, con el fin de medir el valor del torque con que ingresa el tornillo al elemento a unir. El valor del torque no excederá los valores dependiendo del calibre del tornillo del la tabla 12. Teniendo los valores del torque, con la

ayuda de la ecuación 6, podemos encontrar los valores de la fuerza aplicada para el torque y el valor de la carga axial producida por el torque. Hay que tener muy en cuenta que el tornillo no debe de sufrir ninguna deformación.

- Para medir el torque con que falla el tornillo, se realizara la prueba de torsión tal como se hizo en la sección 5.4, teniendo en cuenta que para cada calibre el valor del torque debe estar por encima del valor que describe la tabla 12, y la prueba se realiza como lo muestra la figura 35. Teniendo los valores del torque, con la ayuda de la ecuación 6, podemos encontrar los valores de la fuerza aplicada para el torque y el valor de la carga axial producida por el torque.

8. CONCLUSIONES

Durante el trabajo, se estructuró una herramienta para analizar tornillos autorroscantes, donde se identificaron las variables mas influyentes en este análisis, y un método propuesto para llegar a la identificación de dichas variables.

- La aproximación de los valores obtenidos para las cargas de aplicación de torque, la carga axial producida por el torque y el torque mismo, da veracidad al análisis propuesto en este trabajo.
- En el análisis se identifico que las variables más importantes en el momento en que se aplica el tornillo son la geometría del mismo, el torque para su aplicación y el esfuerzo con el cual se deforma el material a roscar.
- El seguimiento metalografico que se hizo al material con el que se fabrico el tornillo sirve como base para el estudio de tornillería, al ser este un tema que no se toca en los libros.

9. RECOMENDACIONES

- Para la fabricación de tornillería tipo lamina, debemos emplear aceros de bajo carbono, que nos permitan de esta manera la conformabilidad en frío y nos garantice porcentajes ferriticos superiores a un 80%, de tal forma que nos permita obtener buenas capas de cementación que cumplan los requerimientos para este tipo de tornillo y amortigüe la concentración de esfuerzos en el núcleo.
- Uno de los pasos para la fabricación de tornillo mas influyente para el éxito del desempeño de este como autorroscante, esta en la identificación del uso que se le va a dar, lo cual incluye saber que material se va a roscar y sus características, llevado a seleccionar de un material para la fabricación del tornillo, que cumpla con los requerimientos especificados en la identificación del uso.
- Además de la identificación del uso del tornillo, hay que cumplir con las normas técnicas internacionales, que describen no solo la geometría del tornillo, sino también pruebas mecánicas tanto de lamina como se ve en la figura 33, como también de torque, como la describe la norma ANSI 18B 6.4, y se muestran en la tabla 12 describiendo los valores de torque que debe resistir el tornillo para un calibre especifico, y la forma que se de realizar como la figura 35.
- El cumplimiento de estas normas que describen la geometría del tornillo, se debe al desempeño de un buen proceso de fabricación en la sección de remache y rosca. Como también el cumplimiento de las pruebas mecánicas, se debe a un efectivo proceso de tratamiento térmico de cementación.

- No solo los valores del torque y la geometría son las variables mas importantes en el análisis de tornillos autorroscantes, también hay que incluir el proceso de cementación del tornillo, pues de todos lo procesos es el que le da las propiedades de autorroscante.
- La influencia de la geometría y el torque aplicado en la simulación del tornillo dio valores de esfuerzo aproximados en secciones de la superficie donde el valor es constante a lo largo de dicha superficie puntos de la superficie, a los calculados apoyados en ecuaciones. Pero también se dieron valores de esfuerzo en la simulación casi doblando el valor calculado por ecuaciones.
- Al igual que en la realidad cuando se ajusto el tornillo hasta un torque donde la cabeza se rompía, en la simulación con las cargas aplicadas, el tornillo sufrió una deformación y la mayor concentración de esfuerzos ocurrieron debajo de la cabeza del tornillo.
- Para un futuro análisis en un software que utilice el método de elemento finito, tratar de poder dar uso a las propiedades que se obtienen en el tornillo tanto en la superficie como en el núcleo para obtener mejores resultados.

BIBLIOGRAFÍA

BARREIRO APREIZ, José. Tratamiento térmico de los aceros. Madrid: Dossat, 2000. 740 p. ISBN: 84-95312-56-5.

BILLIGMAN/FELDMANN. Estampado y Prensado A Maquina, Manual sobre conformado en frío y en caliente de aceros y metales no férreos. Barcelona: Reverté, 1979. 545 p. ISBN: 84-291-6034-5.

BLAKE, Alexander. Design of Mechanical Joints. New York: Dekker, 1985. 553 p. ISBN: 0-8247-7351-9.

GROVEER, Mikell P. Fundamentos De Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. Naucalpan de Juarez: Prentice Hall, 1997. 1184 p.

GTZ, Tablas para la industria metalúrgica. Barcelona: Reverte S.A, 1984. 187 p.

Industrial Fastener Institute. Inch Fastener Standards, 7 ed. Cleveland: IFI, 2003. 1230 p.

METALS HANDBOOK, Heat treating, Ohio: American Society for Metals, 1981. 895 p. ISBN: 0-87170-010-7.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Recubrimientos electrolíticos con cinc en hierro y acero. Santafé de Bogota, DC: ICONTEC, 1986. 9 p. NTC 2150.

NORTON, Robert L. Diseño de Maquinas. México: Prentice Hall, 1999. 1048 p.

OLIVER. Michael P. The next step in bolted joint analysis. En: Revista "Fastener Technology Internacional. No 28, (Junio – Julio) 2005. ISSN: 0746-2441.

ORLOMOSKI, Roger W, Manual de proceso de rosca. S.I: Fastener Tooling, 1975. 13 p.